引用格式：陈骁帅，旷红伟，柳永清，等，2025. 新元古代冰川侵蚀作用与冰蚀形貌研究进展[J]. 地质力学学报，31（5）：1083−1108. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025141

Citation: CHEN X S，KUANG H W，LIU Y Q，et al.，2025. Research progresses on glacial erosion and Neoproterozoic glacial erosion forms[J]. Journal of Geomechanics，31（5）：1083−1108. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025141

新元古代冰川侵蚀作用与冰蚀形貌研究进展

陈骁帅[1,2]，旷红伟[2]，柳永清[2]，王玉冲[2]，彭　楠[2]，许　欢[3]

CHEN Xiaoshuai[1,2]，KUANG Hongwei[2]，LIU Yongqing[2]，WANG Yuchong[2]，PENG Nan[2]，XU Huan[3]

1. 国家地质实验测试中心，北京 100037；
2. 中国地质科学院地质研究所，北京 100037；
3. 云南大学地球科学学院，云南 昆明 650500

1. *National Research Center for Geoanalysis*, *Beijing* 100037, *China*;
2. *Institute of Geology*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100037, *China*;
3. *College of Earth Sciences*, *Yunnan University*, *Kunming* 650500, *Yunnan*, *China*

Research progresses on glacial erosion and Neoproterozoic glacial erosion forms

Abstract: ［**Objective**］Glacial erosion forms serve as crucial bases for reconstructing the laws of glacial movement and transport-deposition processes in geological history. They are the most explicit diagnostic indicators of glacial thermal regimes and important tools for reconstructing the scale, morphology, dynamics, and evolutionary history of ancient ice sheets. After centuries of development, an internationally recognized classification system of glacial erosion mechanisms and forms has emerged, providing significant references for research on deep-time glaciation. Late Neoproterozoic glacial events have become a heated topic in international geoscience in recent years; however, there has been little systematic introduction to glacial erosion processes and the subglacial erosional forms associated with these events. ［**Methods**］This study summarizes the current research status and previous achievements and combines them with our personal research experience. It categorizes the multi-scale glacial erosional forms created by glaciers (via abrasion, quarrying, and meltwater erosion) on the bedrock beneath the Ediacaran Luoquan Formation (southern North China Craton) and the Cryogenian Yuermeinak Formation (northwestern Tarim Craton). ［**Results**］These forms are categorized into three scales: (1) striations, nailhead striae, crescentic gouges and fractures, and plastically moulded forms (microscale); (2) roche moutonnées, grooves, and ridges (mesoscale); and (3) giant glacial pavements (macroscale). Additionally, the study analyzes and discusses the significance of these forms in understanding the laws of glacial movement. Studies have shown that the heads of nailhead striae and the convex surfaces of the crescentic gouges indicate the ice flow direction, while the convex surfaces of chatter marks and crescentic fractures face away from the ice flow direction. For plastically moulded forms (p-forms) represented by Muschelbruch, the ice mass flows from the sharp convex edge to the transitional edge. The stoss side of roche moutonnée forms an acute angle with the bedrock, and the lee side is characterized by an abrupt fracture surface nearly perpendicular to the bedrock. ［**Conclusion**］Glacial erosional forms are the most direct reflection of glacial thermal regimes and kinematic characteristics. Compared with the Yuermeinak Formation, the glacial erosion forms of the Luoquan Formation are more extensively developed and more diverse. This may be attributed to the gradually intensifying temperate glacial thermal regime from the Cryogenian to the Ediacaran, responding to the special tectonic setting during the final breakup of Rodinia and the gradual assembly of Gondwana. ［**Significance**］Spatial analysis and qualitative and

基金项目：国家自然科学基金项目（42472150，42302123，42072135）；中国地质科学院基本科研业务费项目（JKYQN202421）

This research was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grants Nos. 42472150, 42302123 and 42072135), and the Fundamental Research Fund of CAGS (Grant No. JKYQN202421).

第一作者：陈骁帅（1992—），男，助理研究员，主要从事前寒武纪沉积学研究。Email：chenxiaoshuai34@126.com

通信作者：旷红伟（1969—），女，教授，博士生导师，主要从事前寒武纪沉积学、地层学及油气地质研究。Email：kuanghw@126.com

收稿日期：2025−09−24；**修回日期**：2025−10−26；**录用日期**：2025−10−27；**网络出版日期**：2025−10−31；**责任编辑**：吴芳

quantitative research on late Neoproterozoic glacial erosion forms, as well as comparison with Paleozoic glacial erosional forms, can provide key evidence for addressing critical scientific issues, such as the reconstruction of glacial paleogeography.

Keywords: Neoproterozoic; glacial event; glacial erosion forms; glacial erosion

摘　要：冰川侵蚀形貌是恢复地质历史时期冰川运动规律及搬运–沉积过程的重要依据，是反映冰川热体制的最明确识别标志，也是重建古冰盖的规模、形态、动力学及演化历史的重要工具。经过数百年的发展，国际上已经形成较完善的冰川侵蚀机理和侵蚀形貌分类体系，进而为深时冰川研究提供了重要参考。目前新元古代晚期冰期事件已成为国际地学热点，但相关的冰川侵蚀作用和冰蚀形貌尚未有系统介绍。通过总结目前研究现状和已报道的研究成果，并结合研究经历，文章梳理了冰川通过磨蚀、拔蚀和融水侵蚀作用，在华北克拉通南缘埃迪卡拉纪罗圈组和塔里木克拉通西北成冰纪尤尔美那克组之下基岩上主要形成了：擦痕、钉头刻痕、新月形凿痕和裂隙、塑性塑造形态（小型）；羊背石、沟槽（中型）；巨型冰溜面（大型）等多尺度冰蚀形貌，分析并探讨了其特征对冰川运动规律的指示意义。研究表明，钉头刻痕的头部指示冰流方向，新月形凿痕的新月形凸面朝向冰流方向，而颤刻痕和新月形裂隙的凸面背向冰流方向。以贝壳状断口为代表的塑性塑造形态，其截然的界面指示着冰流方向，而和围岩过渡的界面指示着冰去方向。羊背石的向流面与底床形成一定角度锐角，去流面体现为近乎垂直于底床的截然断面。冰蚀形貌是冰川热体制和运动学规律的最直接反映，罗圈组比尤尔美那克组的冰蚀形貌发育面积更广泛且类型更丰富，可能由于新元古代晚期逐渐加强的暖温冰川热体制所致，响应着罗迪尼亚超大陆最后裂解并逐渐向冈瓦纳大陆聚汇时期特殊的大地构造背景。因此，通过对新元古代冰蚀形貌的空间分析、定性与定量研究，以及与古生代冰蚀形貌的对比研究，期望能够为冰川古地理重建等重要科学问题提供关键证据。

关键词：新元古代；冰川事件；冰蚀形貌；冰川侵蚀作用

中图分类号：P512.4+1　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2025)05−1083−26

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025141

0　引言

新元古代晚期的成冰纪—埃迪卡拉纪冰期事件对当时地球的古气候、古地理和古生态产生深远影响，30多年来一直为国际地学前沿和经久不衰的研究热点。冰川是冰期事件最普遍与最核心的要素，冰盖内部发育的快速运动冰流是冰川运动的主因（Bennett, 2003; Chandler et al., 2018），在其之下基岩表面形成了冰川堆积地貌和不同规模与形态的冰川侵蚀形貌（Braakman et al., 1982; Kleman, 1990; Kor et al., 1991; Jansson et al., 2002; Chandler et al., 2018; Newton et al., 2018; Le Heron et al., 2019a, 2019b），如羊背石、冰斗和冰槽等，造就了地球上最为壮观的景观。冰川侵蚀形貌是恢复地质历史时期冰川运动规律及沉积环境的重要依据，也是反映冰川热体制信息最明确的识别标志。对冰蚀形貌的空间分析是反映冰川运动过程的关键工具，借助其可重建古冰盖的规模、形态、动力学特征及演化历史（Kleman and Borgström, 1996; Boulton et al., 2001; Hildes et al., 2004）。

古人对于冰蚀形貌的研究具有悠久历史。例如，唐代著名旅行家玄奘、杜环等对天山木扎尔特冰川有过生动的记录，“其山险削，峻极于天，自开辟以来，冰雪所聚，积而为凌，春夏不解…”（施雅风等，1979），这可能是冰斗以及角峰和刃脊的直观描述。关于冰川侵蚀过程与冰蚀形貌的正式研究已有百年历史，虽然文献仍在不断增加，但相比冰川沉积过程及堆积地貌的研究仍较少。然而，对冰川侵蚀过程的理解和对冰蚀形貌演化的认识在冰川学和冰川沉积体系建立中具有重要作用。国际冰蚀形貌的研究可大致分为如下几个阶段：①早期基础观测阶段（19世纪末—20世纪中期）。路易斯·阿加西（Jean Louis Agassiz, 1807—1873）于1837年在瑞士自然历史学会提出第一个冰川学说（Warren, 1928; 施雅风和任炳辉，1983），于1840年出版的《冰川研究（Études sur les glaciers）》专著首次系统介绍了冰川流动和搬运剥蚀这一地质事实。Forbes（1843）发现温带冰川底部的碎屑对基岩的刮擦会形成擦痕和磨光面。Andrews（1883）首次系统记录并描述

了多种“不寻常形态”的冰蚀痕迹，补充了对非典型冰蚀形貌的认知。Matthes（1930）提出与冰川磨蚀作用互补的拔蚀作用，即冰体从底床面拔取破碎岩块，为磨蚀提供工具。李四光（1940）描述了于中国庐山和黄山发育的残余冰窖、冰斗和U形谷。②机制与环境关联阶段（20世纪后期）。对冰岩界面侵蚀过程的深入研究开始兴起（Boulton, 1979; Iverson, 1995; Boulton, 1996），例如，Dahl（1965）提出的“塑性塑造形态”（p-forms, plastically moulded forms）用于指示平滑凹陷状的冰蚀形貌。Boulton（1974）建立了冰川侵蚀–搬运–沉积的统一分析框架，解释了冰蚀形貌从微观到宏观的形成逻辑。一系列理论模型也得到创立：Hallet（1979）提出冰底携带碎屑对基岩产生磨蚀的定量理论。Shaw（1994）提出发夹状擦痕是湍流中马蹄形涡流冲刷的产物，而非冰川侵蚀的新观点。进一步地，Sharpe and Shaw（1989）基于加拿大东南部的冰蚀形貌，提出冰下融水（而非传统冰川侵蚀）可以是塑造冰蚀形貌的主导过程。③技术驱动的精细化研究（21世纪以来）。激光雷达（LiDAR）和航天飞机雷达地形测绘任务（SRTM）数据，结合数字高程模型（DEM）分析的广泛应用，实现对基岩裂缝、鼓丘、巨型线理和岩丘岩尾等冰蚀形貌的识别和定量研究（Dühnforth et al., 2010; Hughes et al., 2010; Eyles et al., 2016; Krabbendam et al., 2016）以及冰川槽谷形态的高精度定量化，突破了传统露头沉积学描述的局限，为古冰盖动态研究提供新范式（Le Heron et al., 2022）。利用机器学习模型预测全球冰川侵蚀速率也取得了显著成果（Alley et al., 2019）。

上述基于现代冰川的研究对深时冰蚀形貌研究提供了重要参考。在中国，目前保存最好的深时冰蚀形貌发育在华北克拉通南缘埃迪卡拉纪罗圈组和塔里木克拉通西北缘成冰纪尤尔美那克组之下基岩表面。学者们先后在豫西地区罗圈组（Mu, 1981; 牟用吉，1983; Guan et al., 1986; 关保德等，1988; Wu and Guan, 1988; 杨玉卿和吴瑞棠，1992; Chen et al., 2020; Zhang and Zheng, 2022; 柳永清等，2023; Kuang et al., 2024）和塔西北阿克苏—乌什地区尤尔美那克组之下识别了古冰溜面，并研究了其上发育的精美冰蚀形貌，并对冰川运动学规律和冰川属性类型进行了探讨（高振家等，1982; 陆松年和高振家，1990; Lu and Gao, 1994; Vandyk et al., 2019; Chen et al., 2025）。其中，Le Heron et al.（2019b）首次利用无人机航拍、数字地貌高程模拟和传统地质研究相结合的方法对豫西罗圈组的冰蚀形貌进行了精细刻画。

在中国广泛发育的成冰系和埃迪卡拉系冰碛岩序列完整且现象丰富，已成为全球范围内备受关注的研究对象，但与之相关的冰川侵蚀作用和侵蚀形貌尚未有系统介绍。理解冰川侵蚀过程，对于认识冰蚀形貌的演化及其在冰体重建中的作用至关重要。文章在总结冰川侵蚀作用和侵蚀形貌的研究现状和成果基础之上，以中国豫西和塔西北为研究区，重点针对其2处新元古代冰蚀形貌的研究历史、发育类型和冰川运动学规律进行介绍，并结合国外研究实例，探讨冰蚀形貌在深时冰川的运动学、属性和古地理重建研究中的重要价值。

1　冰川侵蚀作用和冰蚀形貌的分类

1.1　冰川侵蚀作用机理

冰川在地表移动时，会通过磨损、破碎作用剥离、夹带并搬运岩石和沉积物。当冰川向自身边缘流动时，会在冰下、冰内和冰上环境中搬运碎屑物（Bennett and Glasser, 2009）。由于冰川侵蚀作用发生的位置不易直接观察，因此通过分析冰退后最终留下冰川活动证据的典型侵蚀形貌，反向推断冰川侵蚀过程。冰川对基岩的侵蚀作用主要通过冰川磨蚀和冰川拔蚀（挖掘）2种机制实现，这些机制均涉及基岩与沉积物、冰体或水体三者之一的接触作用，但二者在作用过程、产物及影响因素上存在显著差异。除此之外，冰川融水的机械侵蚀和化学侵蚀通常也被归入这2种（冰川侵蚀）作用过程之中（Glasser and Bennett, 2004）。

1.1.1　冰川磨蚀作用

冰川磨蚀作用指由冰川底部携带的单个岩屑的移动或沉积物团块在冰川底床上的滑动所造成的表面磨损（Hindmarsh, 1996）。磨蚀相比拔蚀作用更有助于形成极具特色的冰蚀形貌，例如精美的发育密集擦痕的光滑冰溜面。磨蚀作用首先由岩屑对底床施加应力，从而形成微观裂隙，这些裂隙相互连通后会导致基岩破碎（Ostojic and McPherson, 1987），随后这些破碎的基岩被上覆冰体一并运移并在基岩表面形成擦痕。

1.1.2　冰川拔蚀（挖掘）作用

冰川流动时会在之下底床中产生压力差，进而形成足以导致岩石破裂的应力场，此时基岩便可能

发生破裂（Glasser and Bennett, 2004）。冰川拔蚀作用就是指冰川主动移除基岩块体的过程（Hallet, 1996），包含2个独立过程：①冰川之下基岩的破裂或压碎；②这些破裂或压碎岩块被冰川的挟带。基岩中裂缝的扩展是冰川拔蚀作用得以发生的关键前提，裂缝的来源主要分为3类，即存在的地质构造裂缝，冰缘冻融作用形成的裂缝和冰川运动过程中自身形成的裂缝（Bennett and Glasser, 2009）。

1.2 冰蚀形貌的分类

冰蚀地貌存在多种尺度，反映着冰川作用在不同时间尺度上的侵蚀过程。在基底岩石表面会显现出各种尺度的侵蚀特征。将冰蚀形貌划分为3种尺度（Benn and Evans, 2010），其特征和成因分别探讨如下。

1.2.1 小型冰蚀形貌

小型冰蚀形貌主要包括擦痕和磨光面，颤刻痕、新月形凿痕与裂隙以及塑性塑造形貌（图1—图3）。这类形貌起伏幅度小，且常叠加于更大规模的形貌之上（Glasser and Bennett, 2004）。擦痕代表着岩石表层的侵蚀痕迹（图3a），即顺着冰体运动方向延伸的长条形刮痕，是冰川磨蚀作用的直接产物，长期以来被视为由嵌入冰体中的碎屑颗粒刻划而成的证据（Boulton, 1974; Atkinson, 1984; Iverson, 1991）。单个擦痕的深度通常小于10 mm，但可连续延伸至1 m。根据形态特征，擦痕可分为3类（Chamberlin, 1888; Iverson, 1991）：①类擦痕沿冰川流向逐渐变宽、变深，最终突然终止，末端常呈现为深且壁面陡峭的刻槽。②类擦痕的起始端与终止端均为模糊、纤细的痕迹，沿延伸方向逐渐变宽、变深，在接近中点处达到最大宽度与深度。③类擦痕起始端即为深刻槽，沿冰川流向逐渐变窄、变浅。由于擦痕的走向与冰川运动方向平行，因此其常被用于古流向重建（Demorest, 1938; Kleman, 1990; Lawson, 1996; Mattsson, 1997; Mc Cabe, 1998; Lundqvist, 2020）。在单个基岩露头上，擦痕的方向可能存在显著差异。尽管基岩露头平坦顶面的擦痕通常相互平行，且与平均冰流方向的偏离程度很小，但不规则表面上的擦痕通常会显著偏离（平均冰流方向），这是由冰川底部流动的不规则性所致（Rea et al., 2000）。

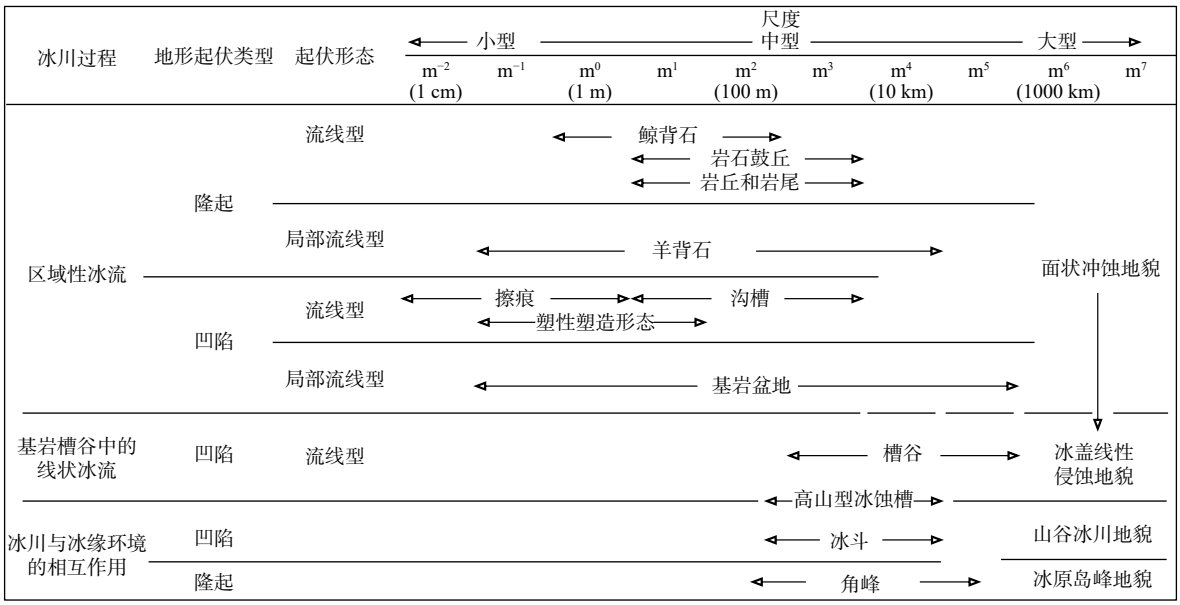
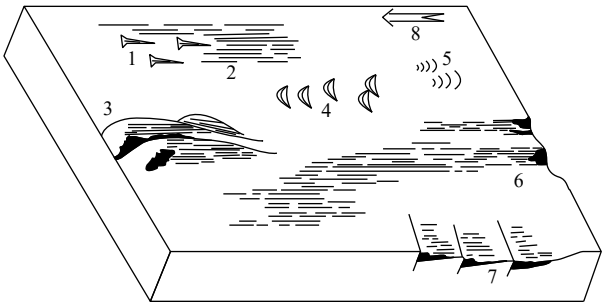


图1 不同尺度冰蚀形貌的分类（Benn and Evans，2010）

Fig. 1 Size classification of multi-scale glacial erosion forms (Benn and Evans, 2010)

颤刻痕、新月形凿痕和新月形裂隙等是发育在基岩表面的破裂痕迹或裂隙（Glasser and Bennett, 2004; 王乃昂等, 2022; 图3b），其中颤刻痕与新月形凿痕具有相似特征，均体现为基岩表面的新月形浅坑。它们记录着由冰川拔蚀作用导致岩片脱落的过程（Benn and Evans, 2010）。凿痕与裂隙均与古冰流方向垂直，呈固定间距/弧度排列，说明破裂事件会按固定间隔发生，可能与冰下融水压力的昼夜变化有关（Benn and Evans, 2010）。新月形凿痕的新月形凸面（或其角部）朝向冰流方向；而颤刻痕和新月



1—钉头刻痕；2—擦痕；3—小型羊背石；4—新月形凿坑；5—新月形裂缝 6—磨蚀沟槽；7—冰蚀坎阶；8—冰川运动方向

图 2　主要中—小型冰蚀形貌特征和对冰川运动方向的指示（据吴瑞棠和关保德，1988 修改）

Fig. 2　Main characteristics of meso- to micro-scale glacial erosional forms and their indications for glacial movement directions (modified after Wu and Guan, 1988)

1—nail head striae; 2—striae; 3—small roches moutonnée; 4—crescentic cracks; 5—crescentic fractures; 6—grooves; 7—glacial steps; 8—movement direction of glacier

形裂隙的凸面则背向冰流方向（吴瑞棠和关保德，1988; Chen et al., 2020）。

“塑性塑造形态”（p-forms, plastically moulded forms）原指冰川侵蚀形成、经塑性塑造的光滑壁面线性或弯曲凹陷，这类形貌的形态最初被认为是冰体围绕基岩障碍物发生塑性流动所形成的（Dahl, 1965），而目前逐渐扩展到与冰川融水具有成因相关联系的多种不同形貌（Kor et al., 1991）。该形态通常呈曲线或直线状，延伸范围一般从 1 cm 至 10 m。根据其与冰川流动方向的关系（平行、垂直或无定向），可分为 3 大类（Kor et al., 1991; 图 3c, 图 4a）。最常见的包括平行流向的纺锤状槽痕（Spindle flute）、内凹侵蚀槽（Cavetto），垂直流向的镰刀状洼地（Sichelwannen）、贝壳状断口（Muschelbruch），无定向的壶穴（Potholes）和波状起伏面（Undulating surface）等（图 4a）。

1.2.2　中型冰蚀形貌

中型冰蚀形貌反映了地质条件、地形特征与冰水流向模式之间的相互作用（图 1）。因此，这类形貌能为了解古冰川环境提供重要线索，尤其是对其开展的形态学研究与现代冰川学理论相结合时，价值更为突出。以羊背石为代表，其典型特征是在横剖面呈显著不对称性，其迎冰面（冰流上游侧，又称 stoss 面）为磨蚀作用形成的光滑面，背冰面（冰流下游侧，又称 lee 面）则是由挖掘作用形成的更陡峭、近似垂直的破碎面（图 3d, 图 4b）。羊背石多呈集群分布（图 3e），规模可从 1 m 到 50 m 甚至 100 m。在羊背石的迎冰面，擦痕和塑性塑造形态可广泛分布。与羊背石的部分流线型相反，鲸背石与鼓丘均为呈长条状流线型、表面平滑的基岩凸起。鲸背石在横剖面呈近似对称性，鼓丘则为非对称，具有更陡峭的迎冰面和逐渐变细的背冰面（Benn and Evans, 2010; 图 4b）。二者共同的特征是缺少羊背石特有的挖掘型背冰面（Sugden and John, 1976）。此外，中型冰蚀形貌还包括磨蚀沟槽和脊、岩丘与岩尾等。沟槽可由冰川磨蚀作用或冰川融水侵蚀作用形成。其形态与冰川擦痕相似，区别在于具有更大的尺寸和深度，其长度通常为 1 ～100 m，宽度通常为 0.5 ～1 m，深度则能达到 1 m（Bennett and Glasser, 2009）。岩丘与岩尾是一类狭长的流线型岩丘，其迎冰面是由抗侵蚀能力强的基岩构成的岩丘，背冰面则延伸出一段由抗侵蚀性较弱岩石或冰碛物构成的并逐渐变细的岩尾（图 3f）。此种形貌由冰川绕岩丘流动形成，岩尾因受岩丘的保护而免遭侵蚀（Benn and Evans, 2010; 图 4b）。

1.2.3　大型冰蚀形貌

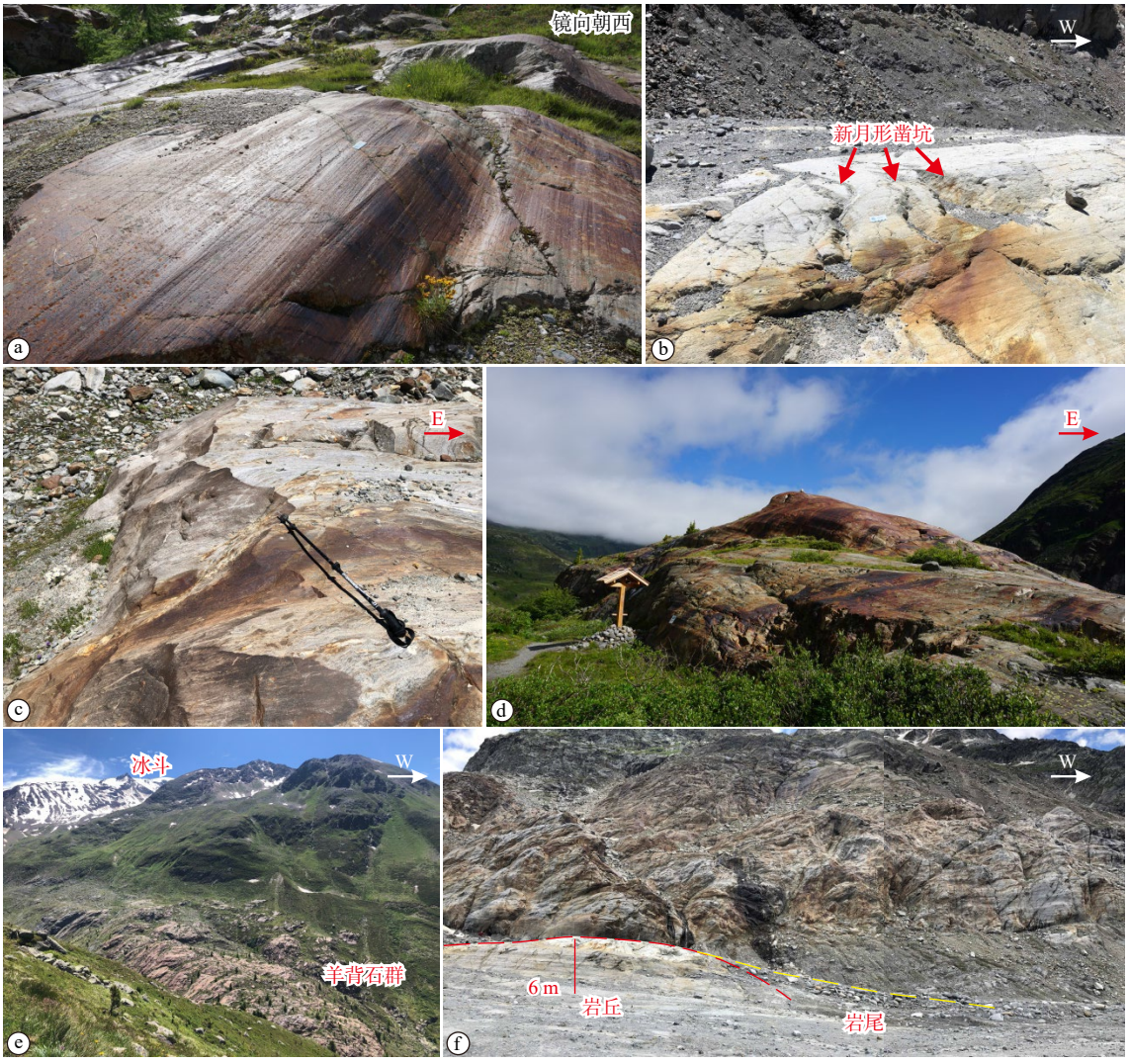
大型冰蚀形貌体量足够大，可构成重要的景观单元，主要包括巨型冰溜面，冰川槽谷和峡湾，冰斗和隧道谷等（Benn and Evans, 2010; 王敏等, 2022; 图 1）。各种中小型冰蚀形貌均可在冰溜面上发育。冰川槽谷和峡湾是切入基岩的深邃线性地貌，冰川槽谷又称U 型谷，由冰川长期下蚀与侧蚀作用形成，横断面呈U 形，谷底宽阔、谷壁较陡，是冰川侵蚀的典型宏观地貌；峡湾仅出现在曾经被冰盖覆盖的山区，本质是被海水淹没的冰川槽谷。当冰川消退后，海平面上升，海水灌入槽谷后便形成了两侧岩壁陡峭、水深巨大的峡湾，是冰川侵蚀与海平面变化共同作用的独特产物。冰斗是向下坡开口的大型凹地（图 3e），其上坡方向被悬崖或陡坡环绕。隧道谷是由冰下融水侵蚀作用形成的线性地貌，其形成与冰川覆盖期冰下融水的流动、侵蚀过程直接相关（Kehew et al., 2012）。

2　中国新元古代典型冰蚀形貌

2.1　华北克拉通豫西罗圈组冰蚀形貌

2.1.1　研究历史

1958 年王曰伦在陕南和豫西发现了冰漂砾，提



a—冰溜面之上密集排列擦痕；b—新月形凿坑；c—塑性塑造形态，贝壳状断口；d—羊背石；e—远处的冰斗和冰缘环境中的羊背石群；f—岩丘与岩尾，岩丘高6 m

图3 奥地利蒂罗尔州阿尔卑斯山东段Kaunertal现代冰川冰蚀形貌

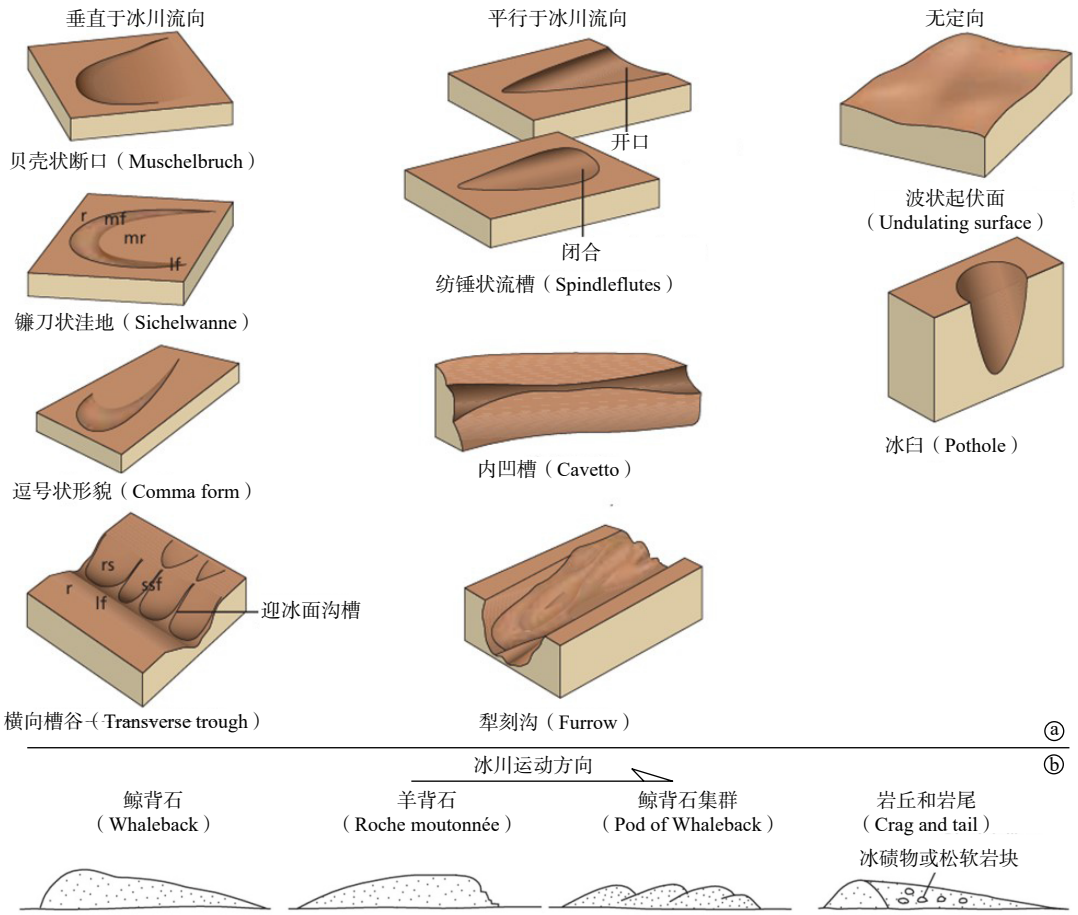
Fig. 3 Glacial erosional forms of modern glaciers in Kaunertal, eastern section of the Alps, Tyrol, Austria

(a) Densely arranged striations on the pavement; (b) Crescentic cracks; (c) P-form, Muschelbruch; (d) Roche moutonnée; (e) Distant cirque and a group of roches moutonnées in the periglacial environment; (f) Crag and tails (the crag is 6 meters high)

到秦岭北坡也会有前寒武纪冰川存在；同年杨志坚阐明了其冰川成因，并命名为临汝冰碛层；1959年叶连俊领导的中国科学院磷矿队也论证了豫西冰碛层的发育。后经刘长安和林蔚兴等工作后，证实了该套冰碛层的存在，并在1960年命名为罗圈组（图5a；叶干，1984）。此后引起了国内外关注，Mu（1981）、牟用吉（1983）、Guan et al.（1986）、关保德等（1988）、Wu and Guan（1988）、杨玉卿和吴瑞棠（1992）先后在豫西罗圈组下伏基岩表面识别出冰溜面，系统研究了其上发育的冰蚀形貌，探讨了冰川运动学规律。Le Heron et al.（2018）进一步研究了河南西部和陕西东部罗圈组沉积特征，并对局部冰溜面和冰蚀形貌进行了再研究，总结了罗圈组大陆冰川以及沉积环境演化模式。Chen et al.（2020）在前期研究基础上，详细分析了多尺度冰蚀形貌的特征和成因，也认为罗圈组属于典型大陆冰盖冰川，具有从北部高地向南部海洋逐渐推进的运动学规律。

2.1.2 冰蚀形貌类型

在从北至南的方向上，罗圈冰期的冰蚀形貌在豫西洛阳上徐马—汝州赶旦场—鲁山石门沟一线得以保存，在前寒武纪冰期中罕见的巨型古冰溜面表面可见一系列保存完好的多尺度冰蚀形貌。



a—塑性塑造形态的分类与特点；b—鲸背石、羊背石、岩丘和岩尾示意图

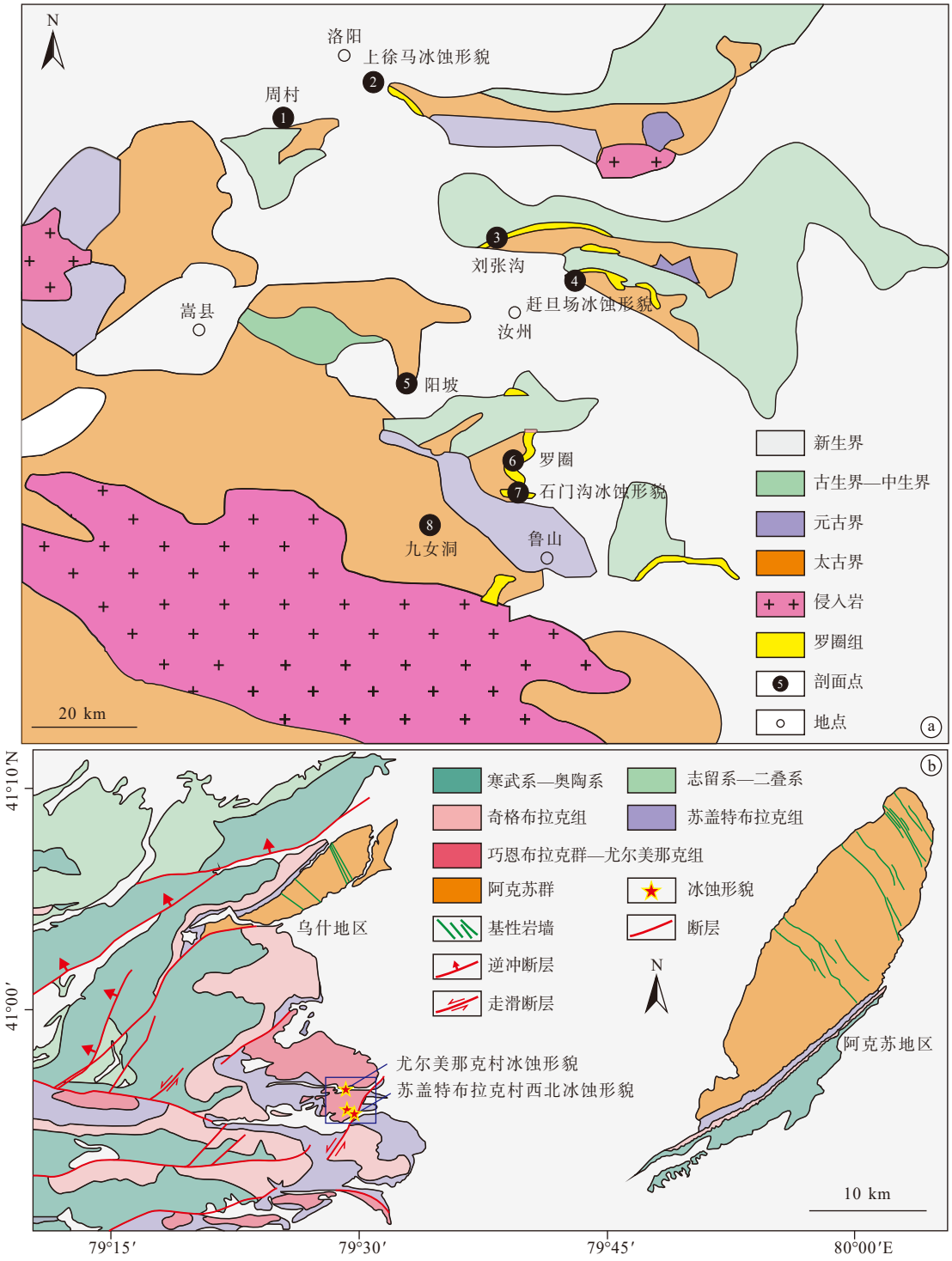
图 4　塑性塑造形态（p-forms）和流线型/局部流线型冰蚀形貌的分类（据 Kor et al.，1991；Bennett and Glasser，2009 修改）

Fig. 4　Classification scheme for p-forms and streamlined or partially streamlined glacial erosion forms (modified after Kor et al., 1991; Bennett and Glasser, 2009)

(a) The classification and characteristics of p-forms; (b) Schematic sketches of whaleback, roche moutonnée, pod of whaleback, and crag and tail forms

（1）大型冰蚀形貌。豫西地区罗圈组冰碛岩之下的中元古代基底石英砂岩表面，是全球保存最为完好的埃迪卡拉纪冰川冰溜面之一，其他已知的规模相当的同类冰蚀形貌和景观在澳大利亚西北的 Kimberley（Corkeron and George, 2001）和西非摩洛哥的 anti-Atlas（Germs and Gaucher, 2012; Vernhet et al., 2012; Letsch et al., 2018）等地区可见到。单个冰溜面的面积范围从 10000 m^2 到 100 m^2 不等，例如在石门沟地区发育有 4 处冰溜面（图 6—图 8），赶旦场地区发育有 3 处，上徐马地区的 1 处冰溜面因道路施工的破坏仅残留极小部分（图 9）；这些冰溜面上发育有丰富的小—中尺度冰蚀形貌。

（2）中型冰蚀形貌。包括磨蚀沟槽和脊，羊背石和冰蚀坎阶。冰蚀坎阶在石门沟和赶旦场剖面的冰溜面上可见，呈一级级下降的台阶状，阶梯每级高 15～30 cm，一般连续出现 3～4 个坎阶（图 7a—7c）。坎与界面相交的坎缘有时体现为浑圆状，其上有擦痕，方向与坎棱正交。磨蚀沟槽和脊在上徐马剖面尤为典型（图 9），体现为较大的，磨蚀较深的沟槽群和其之间的隆起，可达 5 ～20 cm 宽，10 cm 深，在横切面上具有波峰—波谷的样式，可能体现了冰底携带着的较大尺寸的块体，在冰川融水的润滑作用下，以犁刻的形式在底床上刻蚀而成。羊背石在赶旦场剖面发育，在光滑的迎冰面上可见与长轴方向一致的擦痕，在背冰面可见横向发育的节理（Chen et al., 2020）。当擦痕等小型冰蚀形貌仅能记录非常局部的冰流模式时，中等尺度的冰蚀形貌就可以更加清晰地反映出冰川和基岩的关联，这是因



a—华北克拉通南缘豫西区域地质图(Guan et al., 1986)；b—塔里木西北缘阿克苏—乌什区域地质图(高振家等, 1982)

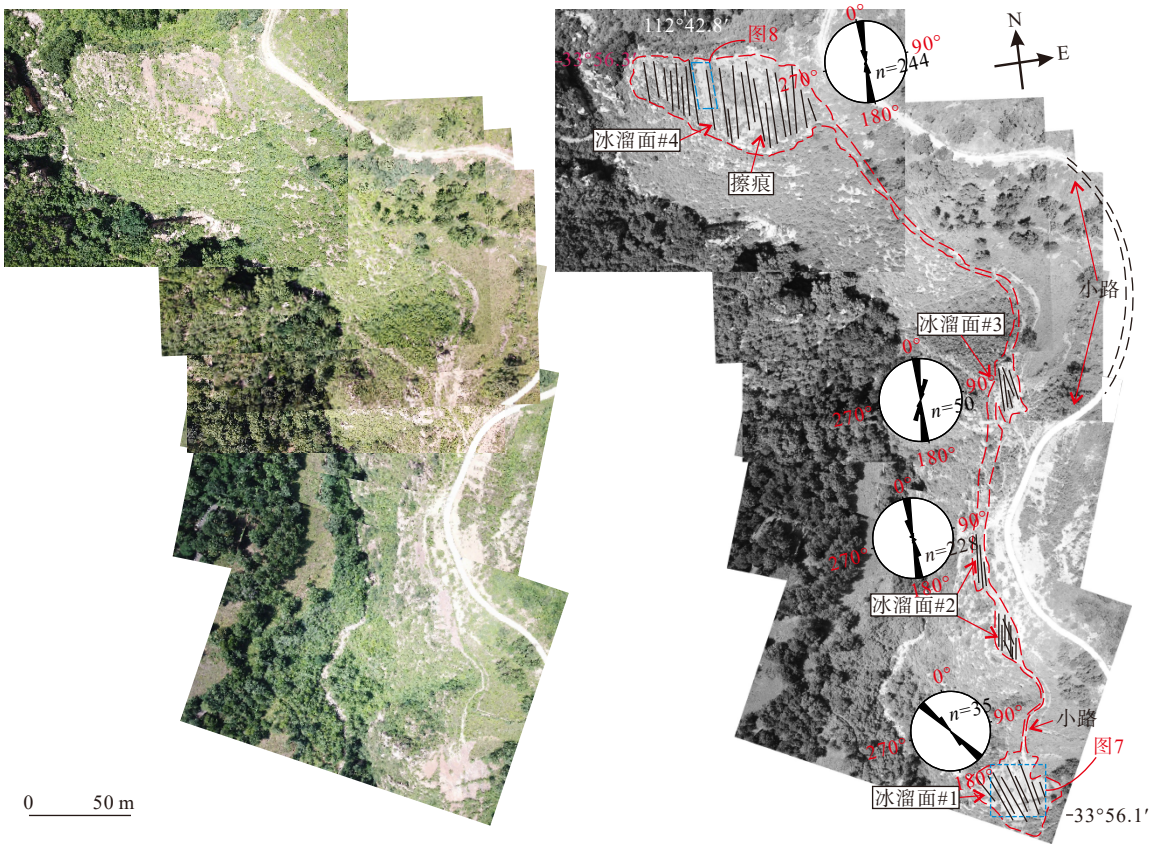
图 5 研究区区域地质图

Fig. 5 Regional geological maps of the research areas

(a) Regional geological map of western Henan, southern margin of the North China Craton (Guan et al., 1986); (b) Regional geological map of Aksu–Wushi, northwestern margin of the Tarim Craton (Gao et al., 1982)

为此时地貌学上的变化以及冰流的模式能够被更清晰、更容易地被观察到。

(3)小型冰蚀形貌，包括擦痕，新月形裂隙和凿坑和塑性塑造形态。擦痕是罗圈组之下冰溜面上



从南至北依次发育 1 号到 4 号冰溜面；玫瑰花图代表擦痕走向；*n* 代表统计擦痕数量（下图同）

图 6　华北克拉通南缘豫西鲁山石门沟罗圈组古冰溜面群航拍图（Chen et al.，2020）

Fig. 6　Composite aerial photographs of the pavements in Shimengou, west Henan province, southern North China Craton (Chen et al., 2020)

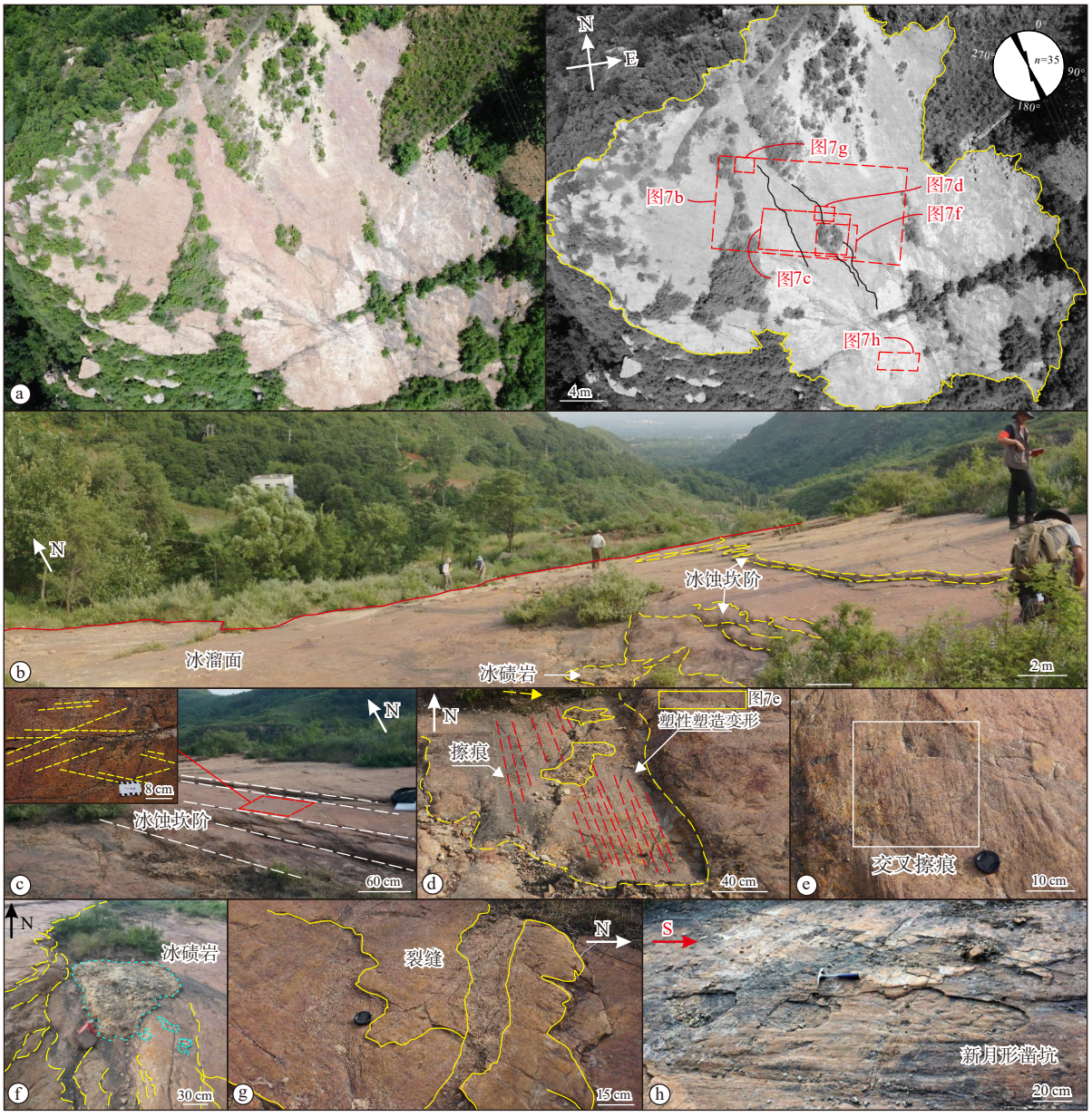
From approximately south to north, four pavements are alongside the road. The rose diagram shows the strike of striae measured on striated surfaces on the four pavements, *n* denotes the number of striations.

最常见的形貌，宽 5 mm 至 1 cm，一般延伸不远，偶见长达 5 m 者。擦痕一般密集平行出现（图 7d），在多数情况下，多组擦痕也会相互斜交（图 7e），且有时可见擦痕深切至冰溜面表面的滞碛中（图 7f），指示着两期或更多期次的冰川运动。横切面上，擦痕体现为弧形，向着冰川流动方向逐渐变浅，表明冰下携带的块体逐渐变钝的过程（Menzies et al., 2018）。在石门沟剖面，钉头刻痕作为擦痕的一种（Iverson, 1991 定义的 I 型擦痕）被识别出，因为规模较小，在遭受风化侵蚀后变得模糊。其规模小至厘米级，钉头方向的相对深且宽的凹坑代表着冰川底部块体磨蚀的突然中止。此外，发夹状擦痕也发育，形貌上在发夹头部呈新月形，两侧为笔直的深切擦痕。

新月形裂隙是冰川底床被压裂、较规则地成组出现的裂隙，一般宽度超过 5 cm，长度一般为 10～30 cm，由多个裂隙紧密堆叠而成（图 7g）；新月形凿坑平均长 20～60 cm，坑深 1～2 cm，间隔稍大且堆叠并不紧密，尺寸也可大于新月形裂隙（图 7h），周围发育有密集的擦痕，二者均在石门沟剖面广泛发育。塑性塑造形态的产出形态多样，例如在石门沟冰溜面上发育的纺锤状流槽（图 8a、8b），贝壳状断口（图 8a、8c）以及沟渠状内凹槽（图 8d），并均伴生发育丰富的擦痕和多面状构造（图 8e—8h）。和现代冰川的侵蚀形貌进行类比，塑性塑造形态一般是在温带或冷温复合冰川的冰下环境中形成（Hambrey and Glasser, 2012）。

2.1.3　冰蚀形貌对冰川运动的指示

擦痕被视为冰川运动方向和冰流模式的最佳指示标志，在上徐马、赶旦场和石门沟 3 处剖面的基岩冰溜面上，共测量记录了 956 条擦痕的走向（图 6，图 9；Chen et al., 2020）。结果显示，擦痕的平均走向为 163°，其中赶旦场剖面的擦痕走向主要分布在 150°～160°之间，另有几组走向约为 180°。上



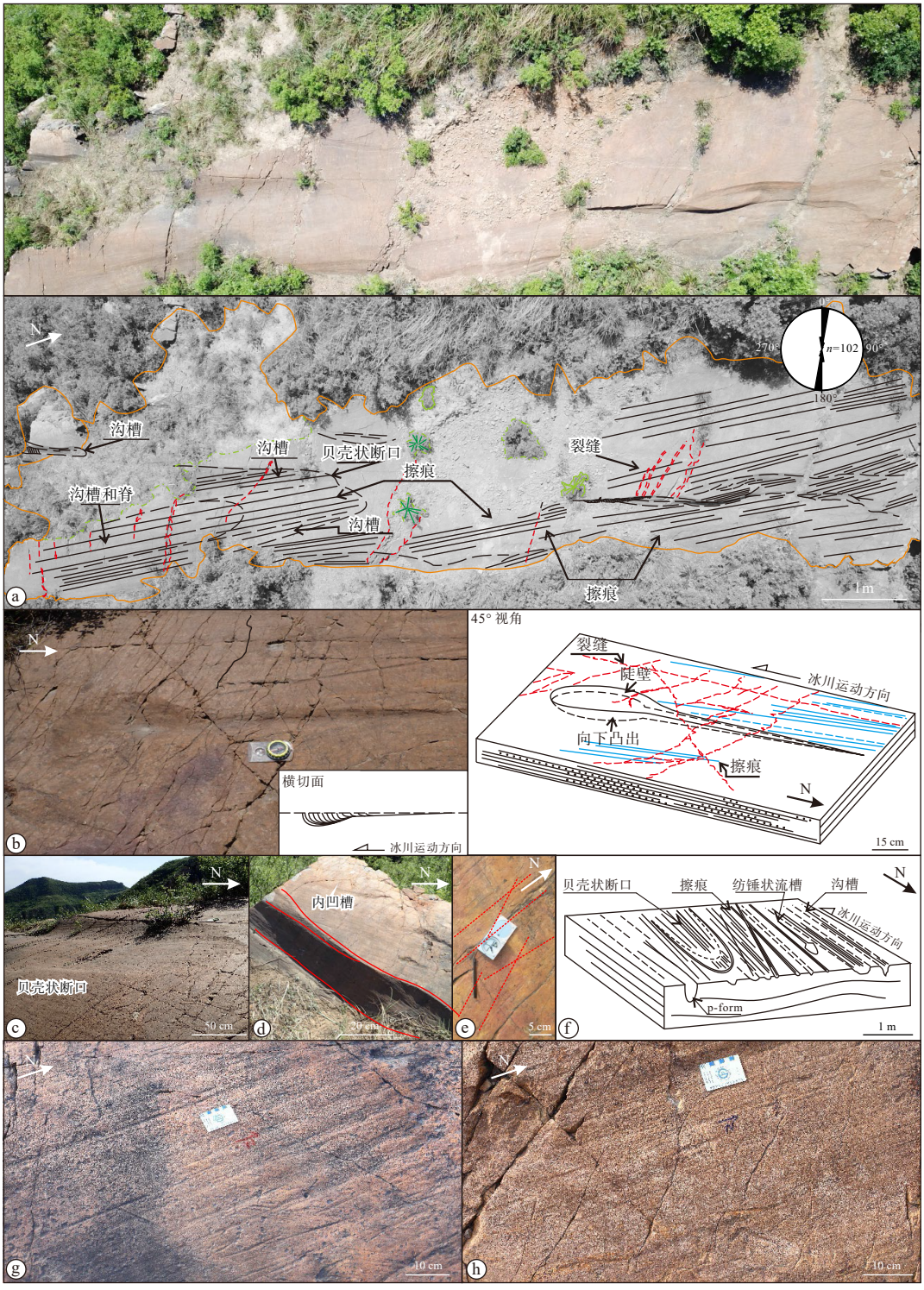
a—石门沟剖面1号冰溜面；b—冰蚀坎阶；c—冰蚀坎阶和交错擦痕；d—塑性塑造形态和擦痕；e—交错擦痕；f—滞碛和擦痕；g—冰蚀裂隙；h—新月形凿坑

图7 豫西石门沟罗圈组1号冰溜面冰蚀形貌及冰川运动方向指向性（据Chen et al.，2020修改）

Fig. 7 A bird's eye view of Pavement 1 in the Shimengou, west Henan province, with indications of glacier movement (modified after Chen et al., 2020)

(a) Pavement 1 at the Shimengou section; (b) Glacial steps; (c) Glacial steps and cross striae; (d) P-forms and striae; (e) Cross striae; (f) Lodgement deposit and striae; (g) Fractures; (h) Crescentic cracks

徐马剖面擦痕的平均走向为150°。在石门沟剖面，1号冰溜面上的擦痕走向范围为140°～160°，而其他冰溜面上的擦痕走向则在180°～190°之间。擦痕一般向着冰川前进方向变宽变深，为动力减小或砾石被卸载而形成，然而擦痕的形态和深浅、宽窄与上覆冰体的剥蚀强度有关，但当冰川剥蚀强度是增强还是减弱并不明朗时，利用擦痕可能就不能准确判断冰川运动方向，同时，擦痕判断运动方向还存在多解性。因此，当只有擦痕作为判断冰川运动方向的依据显得不那么充分时，其他冰蚀形貌可以一并作为推断古冰流方向的辅助证据。例如，新月形裂隙和凿坑，新月形的角朝向冰川运动的方向，而后者新月形角的方向指示着冰川来的方向；塑性塑造形态的形貌也可以用来判断冰川运动方向，例如贝



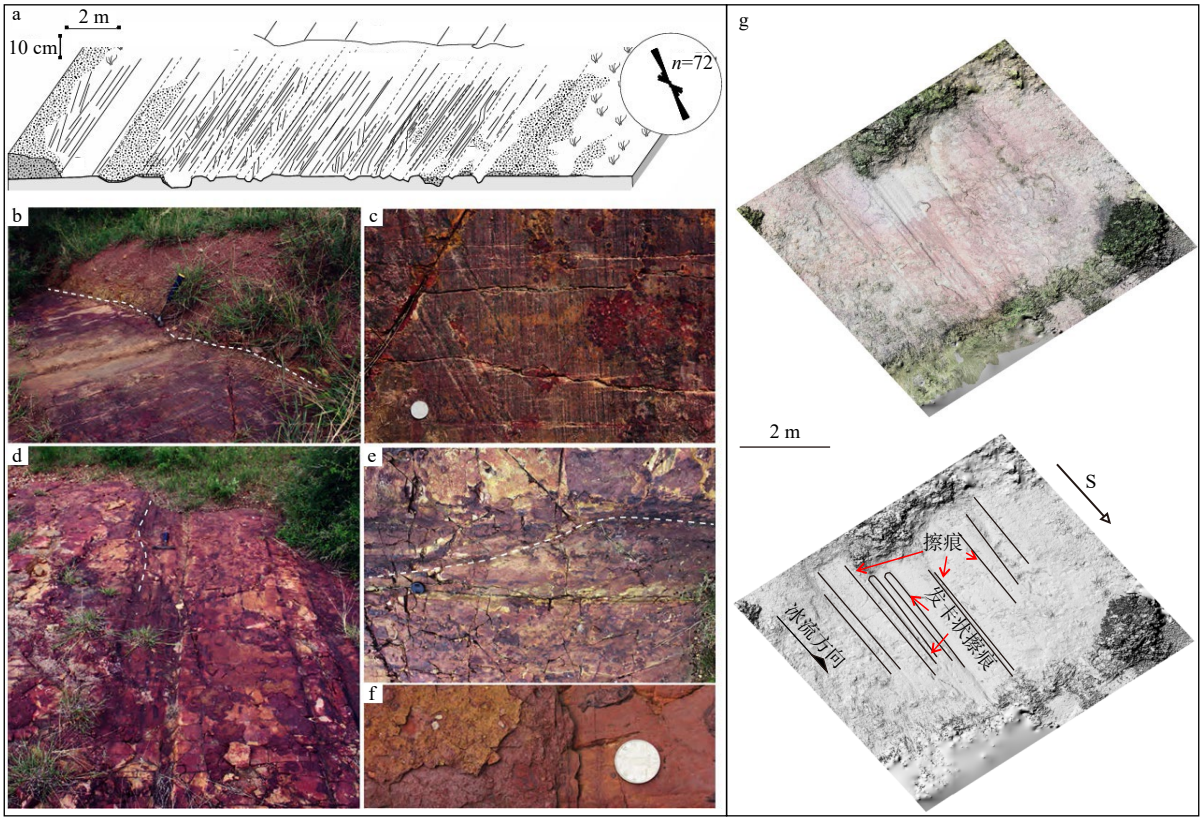
a—石门沟剖面 4 号冰溜面；b—纺锤状流槽；c—贝壳状断口；d—内凹槽；e—交错擦痕；f—4 号冰溜面上发育的典型冰蚀形貌模式图；g—密集排列的交错擦痕；h—密集排列的擦痕

图 8　豫西石门沟罗圈组 4 号冰溜面冰蚀形貌及冰川运动方向指向性（据 Chen et al.，2020 修改）

Fig. 8　A bird's eye view of Pavement 4 in the Shimengou area, west Henan province, with indications of glacier movement (modified after Chen et al., 2020)

(a) Pavement 4 at the Shimengou section; (b) Spindle flute; (c) Muschelbruch; (d) Cavetto; (e) Cross striae; (f) Model of typical erosional forms of pavement 4; (g) Densely packed cross-striations; (h) Densely packed striations

壳状断口的较凸出、截然的界面指示着冰体来的方向，而指示冰去方向的界面则体现出和围岩过渡的特点；羊背石是在冰下侵蚀底床上形成的流线型构造，具有向着冰川前进方向的不对称特征，长轴延长方向平行于冰川运动方向，一般向流面与底床形成一定角度的锐角，表面发育擦痕，去流面则体现出被刨蚀而成的截然断面，近乎垂直于底床；冰蚀坎阶的爬升方向也指示着冰川的流动方向。综合上述冰蚀形貌对冰川运动方向的指示情况，罗圈组冰川总体从西北向东南方向运动，该结论与 Guan et al.（1986）最初提出的观点一致。而交叉擦痕则表明在同1个冰川旋回内，存在不止1个冰下磨蚀阶段，且冰流模式可能发生了演变。在单个露头上，擦痕的宽度、深度、长度及完整性差异显著，这或许可证明冰流速度与融水存在情况具有变异性，也支持了冰川侵蚀过程对罗圈组下伏基底地层序列的完整性和厚度起着重要控制作用的推断（Chen et al., 2020）。



a—上徐马剖面冰溜面素描图；b—冰溜面及之上冰碛岩的接触关系；c—交错擦痕；d—露头尺度下部分擦痕的曲线形态；e—弯曲形态的擦痕；f—被冰碛岩覆盖的发育擦痕冰溜面，冰碛岩最底部中发育少量擦痕；g—冰溜面的数字高程模型，可见发夹状擦痕

图9 豫西上徐马罗圈组冰溜面冰蚀形貌及冰川运动方向指向性（据 Le Heron et al., 2018; Chen et al., 2020 修改）

Fig. 9 Pavement in Shangxuma, west Henan Province, and indications of glacier movement (modified after Le Heron et al., 2018; Chen et al., 2020)

(a) Sketch drawing of a striated pavement at the Shangxuma section; (b) Contact between a striated pavement and diamictites directly overlying it; (c) Cross-cutting striations; (d) The curvilinear nature of striations at the outcrop scale; (e) Striations in curvilinear shape; (f) Striated pavement draped by diamictite; some striations also developed in the basal part; (g) A digital elevation model (DEM) of the pavement at Shangxuma, showing the hairpin striae

2.2 塔里木克拉通西北阿克苏尤尔美那克组冰蚀形貌

2.2.1 研究历史

中国唯一的成冰纪冰蚀形貌位于塔里木克拉通西北的阿克苏—乌什地区，一系列精美的多尺度冰蚀形貌保存完整，其之上马雷诺冰期尤尔美纳克组发育冰碛杂砾岩、含砾砂岩和粉砂岩的沉积岩石组合（图5b）。陆松年和高振家（1990）首先对尤尔

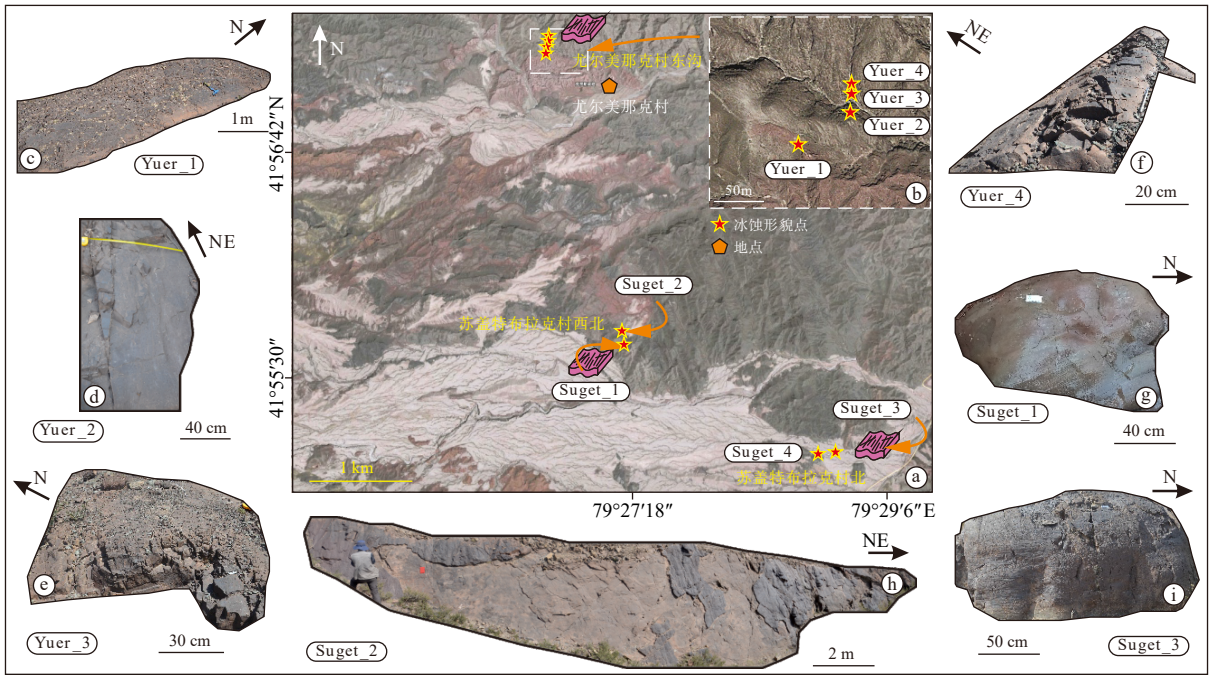
美纳克泉一带局部出露的 3 处发育在成冰纪巧恩布拉克群砂岩不同层位之上的冰溜面进行了初步研究(每处暴露面积近 1 m^2)，在光滑的基底岩石表面上可见丰富的冰川擦痕和沟槽，并据此推测了向南西方向的冰川运动规律，但受限于当时认识程度和技术手段，未能进一步深入(Lu and Gao, 1994)。最近 Vandyk et al.(2019)对其中 1 处冰溜面进行了再次观测和描述，并提出了冰川运动规律的认识与沉积模型。但其研究范围过小，且识别的冰蚀形貌类型和数量都相对有限。Lu et al.(2024)对阿克苏—乌什地区的尤尔美那克组—苏盖特布拉克组盖帽白云岩序列进行沉积学研究时，同样提到了尤尔美纳克村的冰溜面，但未开展详细冰川运动学研究。

2.2.2　冰蚀形貌组合分布

冰蚀形貌在空间上集中分布于尤尔美那克村和苏盖特布拉克村周边的 3 个区域，分为 3 个冰蚀形貌组合。其中，组合 1 发育于尤尔美那克村一带乔恩布拉克群砂岩之上。以往研究主要关注组合 1 中沿山脊分布的 Yuer_1 形貌单元，如 Lu and Gao (1994)、Vandyk et al.(2019)(图 10, 图 11a、11b)。但实际上，在 Yuer_1 的东北方向至山顶区域，还出露了更多高质量的侵蚀形貌(即 Yuer_2、Yuer_3 和 Yuer_4; 图 11, 图 12)，每个侵蚀形貌单元均包含面积可达数平方米的擦痕面。此外，苏盖特布拉克村周边出露的侵蚀形貌，其规模与保存状况均优于尤尔美那克村。根据分布特征，组合 2(包括 Suget_1、Suget_2)位于苏盖特布拉克村西北部(图 13)；而由 Suget_3 与 Suget_4 构成的组合 3 则位于苏盖特布拉克村北部(图 14)。组合 2 与组合 3 同样发育于乔恩布拉克群之上，且之上未见冰碛岩，或仅被具典型帐篷构造与叠层石的盖帽碳酸盐岩所覆盖。

2.2.3　冰蚀形貌组合类型

组合 1 中，Yuer_1、Yuer_2 和 Yuer_4 为冰溜面，Yuer_3 属于羊背石。Yuer_1、Yuer_2 和 Yuer_4 中各种类型的冰川擦痕发育非常普遍，但是由于冰溜面的保存和出露情况，Yuer_1 和 Yuer_4 中擦痕的深度和宽度通常均为 0.5 cm，延伸距离较短，主要呈北东—南西走向，是冰川侵蚀作用的良好指示(图 11b)。

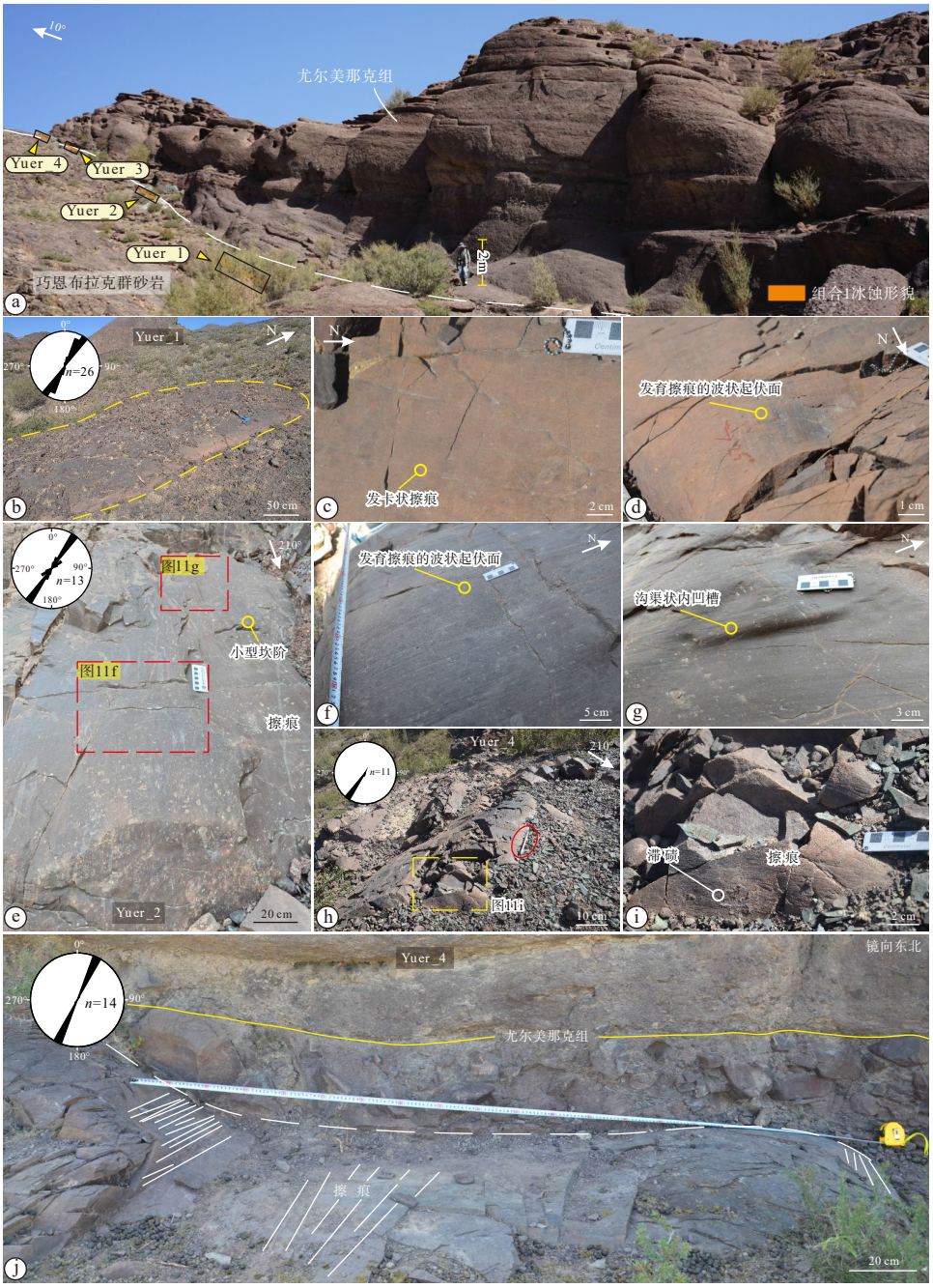


a—尤尔美那克村东沟和苏盖特布拉克村北部的冰蚀形貌分布；b—尤尔美那克村东沟 4 处冰蚀形貌空间分布；c—Yuer_1 冰蚀形貌；d—Yuer_2 冰蚀形貌；e—Yuer_3 冰蚀形貌；f—Yuer_4 冰蚀形貌；g—Suget_1 冰蚀形貌；h—Suget_2 冰蚀形貌；i—Suget_3 冰蚀形貌

图 10　塔西北阿克苏—乌什地区尤尔美那克组冰蚀形貌空间分布（据 Chen et al.，2025 修改）

Fig. 10　The spatial distribution of glacial erosion forms of the Yuermeinak Formation in the Aksu–Wushi area, northwestern Tarim (modified after Chen et al., 2025)

(a) Glacial erosion forms around the Yuermeinak and northern Sugetbrak villages; (b) The spatial distribution of four glacial erosion forms in the east gully of Yuermeinak village; (c) Yuer_1 erosional form; (d) Yuer_2 erosional form; (e) Yuer_3 erosional form; (f) Yuer_4 erosional form; (g) Suget_1 erosional form; (h) Suget_2 erosional form; (i) Suget_3 erosional form

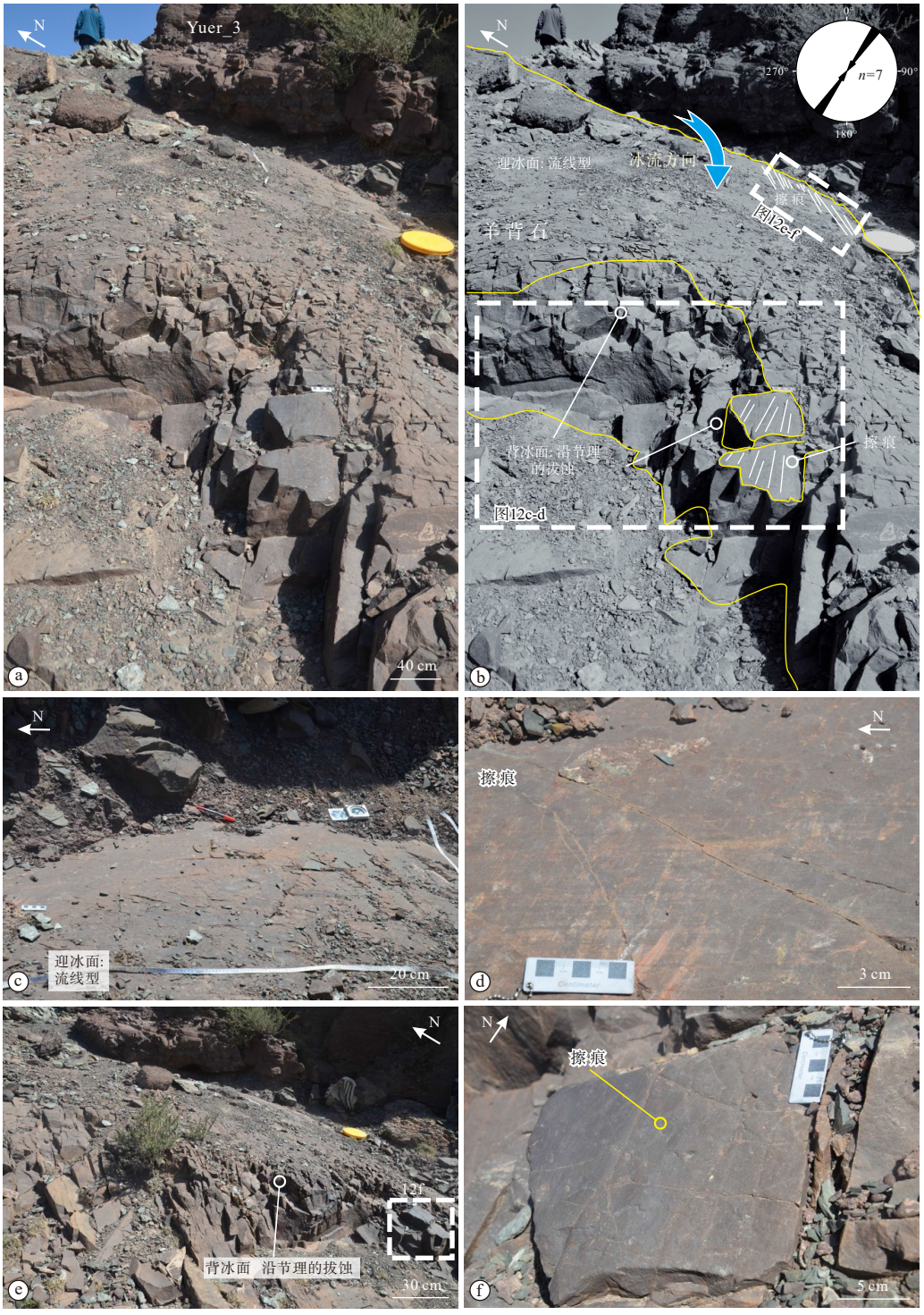


a—Yuer_1, Yuer_2, Yuer_3 和 Yuer_4 冰蚀形貌全景图；b—Yuer_1 冰蚀形貌；c—Yuer_1 冰蚀形貌中的发夹状擦痕；d—Yuer_1 冰蚀形貌中的发育擦痕的波状起伏面；e—Yuer_2 冰蚀形貌；f—Yuer_2 冰蚀形貌中的发育擦痕的波状起伏面；g—Yuer_2 冰蚀形貌中的沟渠状内凹槽；h—Yuer_4 冰蚀形貌；i—冰溜面表面的滞碛；j—Yuer_4 冰蚀形貌，冰溜面和之上冰碛岩

图 11 塔西北阿克苏—乌什地区尤尔美那克村东沟剖面 Yuer_1、Yuer_2 和 Yuer_4 冰蚀形貌（据 Chen et al.，2025 修改）

Fig. 11 Glacial erosional forms of Yuer_1, Yuer_2 and Yuer_4 in the east gully section of Yuermeinak village in the Aksu–Wushi area, northwestern Tarim (modified after Chen et al., 2025)

(a) Panorama of erosional forms of Yuer_1, Yuer_2, Yuer_3, and Yuer_4; (b) Erosional form of Yuer_1; (c) Erosional form of Yuer_1, hairpin striae; (d) Erosional forms of Yuer_1, undulating surface with striae; (e) Erosional forms of Yuer_2; (f) Erosional forms of Yuer_2, undulating surface with striae; (g) Erosional forms of Yuer_2, steep-sided cavetto; (h) Erosional forms of Yuer_4; (i) Lodgement deposit on the pavement surface; (j) Glacial pavement of Yuer_4 and the diamictite above it

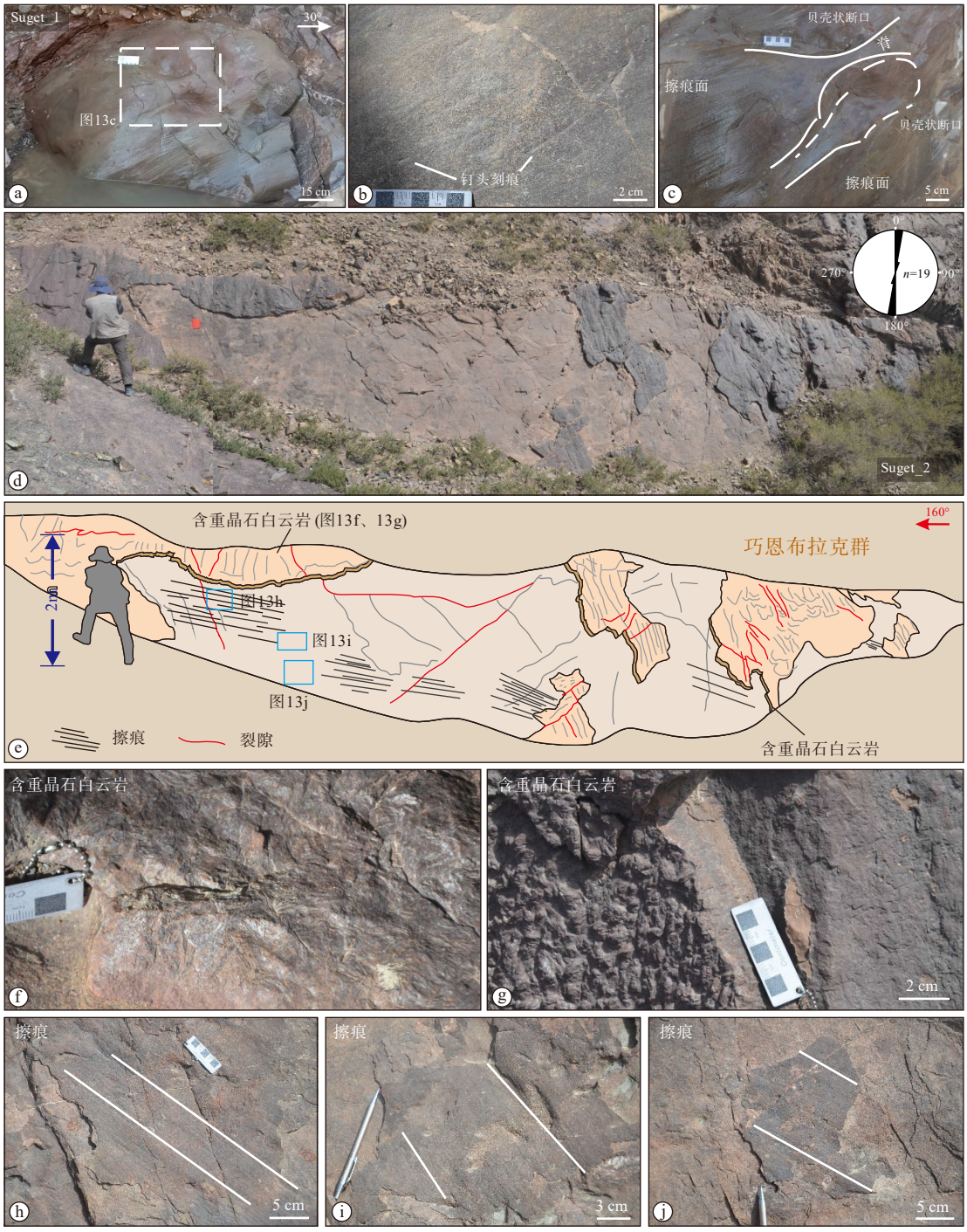


a—羊背石全景图；b—全景图显示了羊背石迎冰面（朝向东北的一侧）与背冰面（朝向西南的一侧），二者可指示冰流方向；c—羊背石流线型的迎冰面；d—迎冰面的擦痕面；e—羊背石的背冰面可见沿节理发育的冰川拔蚀作用；f—背冰面的擦痕面

图 12　塔西北阿克苏—乌什地区尤尔美那克村东沟剖面 Yuer_3 冰蚀形貌（据 Chen et al.，2025 修改）

Fig. 12　Glacial erosional form of Yuer_3 in the east gully section of Yuermeinak village in the Aksu–Wushi area, northwestern Tarim (modified after Chen et al., 2025)

(a) Panorama of the roche moutonnée; (b) Panorama of the roche moutonnée shows the stoss side (northeast-facing side) and the lee side (southwest-facing side) that indicate the direction of ice flow; (c) The streamlined stoss side of the roche moutonnée; (d) The striated surface of the stoss side; (e) The lee side of the roche moutonnée shows glacial plucking along joints; (f) The striated surface of the lee side



a—Suget_1 小型冰蚀形貌；b—钉头刻痕；c—贝壳状断口和中间隆起的脊；d—Suget_2 中型冰蚀形貌；e—Suget_2 中型冰蚀形貌的抽象素描图；f—直接覆盖于 Suget_2 冰蚀形貌之上的含重晶石白云岩；g—含重晶石白云岩，可见针状晶体形态的重晶石；h—Suget_1 小型冰蚀形貌（擦痕1）；i—Suget_1 小型冰蚀形貌（擦痕2）；j—Suget_1 小型冰蚀形貌（擦痕3）

图 13 塔西北阿克苏—乌什地区苏盖特布拉克村西北 Suget_1 和 Suget_2 冰蚀形貌（据 Chen et al.，2025 修改）

Fig. 13 Glacial erosion forms of Suget_1 and Suget_2 in the northwest of Sugetbrak village in the Aksu–Wushi area, northwestern Tarim (modified after Chen et al., 2025)

(a) Microscale erosional forms of Suget_1; (b) Nailhead striae; (c) Two erosional forms of muschelbrüche and the ridge in the middle; (d) Mesoscale erosional forms of Suget_2; (e) Abstract sketch of Suget_2; (f) Barite-bearing dolomite draped directly on the erosional form of Suget_2; (f) Barite-bearing dolomite with needle-like shape barites; (h) Microscale erosional form (striae1) in Suget_1; (i) Microscale erosional form (striae2) in Suget_1; (j) Microscale erosional form (striae3) in Suget_1

在 Yuer_1 中可见发夹状擦痕，宽度为 0.5 ～2 cm，长度为 3 ～8 cm，形貌上在发夹头部呈新月形，开口朝向南西，两侧为笔直擦痕（图 11c）。Yuer_2 中擦痕的保存数量和密集程度要更好，但大部分擦痕的深度和宽度与 Yuer_1 中类似，但是可见更多的长度达 10 cm 以上且宽度更宽的笔直擦痕。除不同类型擦痕外，在 Yuer_1 和 Yuer_2 中还可见小型塑性变形构造，例如在 Yuer_1 和 Yuer_2 中的小型起伏面（图 11d—11f），其内部和外围均被擦痕切割；在 Yuer_2 中还可见小型沟渠状内凹槽，向内明显具有一定弯曲弧度，形成一面相对较陡、一面相对较缓的形态，其表面也发育丰富的短小擦痕（图 11g）。冰蚀坎阶的高度约 0.3 cm 至 1 cm，坎阶与冰溜面相交的坎缘可见截然过渡，也可体现为以较缓的斜面逐渐过渡（图 11e）。Yuer_4 位于山顶（图 11h、11i），在此处可清楚观察到冰溜面与上覆冰碛岩的接触关系，在后者底部的粗—中砾砾石表面发育擦痕并可见熨斗状形态，可见约 30 cm 砾径粗砾直接位于冰溜面之上（图 11j）。对这 3 处冰蚀形貌的擦痕一共测量了 68 组走向数据，平均值分别为 205°、216°和 209°，指示着北东—南西向的冰川运动方向。

Yuer_3 为典型羊背石，整体形貌体现为中部向上拱起、两侧向下弯曲延伸，局部具有流线型特征（图 12a、12b）。向北东一侧为发育擦痕的弯曲面（图 12c、11d），南西的一侧具有冰川刨蚀特点，基底岩石沿节理被刨蚀破碎且断面方向垂直于基底（图 12e、12f）。测量了 7 组擦痕走向数据，平均值为 213°，也指示着北东—南西的冰川运动方向。

组合 2 包括 Suget_1 和 Suget_2，均位于苏盖特布拉克村西北，二者具有的最独特和罕见特征是，不同于埃迪卡拉纪盖帽白云岩一般覆盖于冰碛岩之上，而是含重晶石扇的盖帽白云岩直接发育在冰溜面之上。Suget_1 冰溜面出露部分长约 1 m，宽约 90 cm，除发育交叉擦痕和钉头刻痕外（图 13a、13b），还可见 2 处贝壳状断口与二者中间形成的凸起的中脊，继续向南逐渐形成 1 个两侧圆滑、中间隆起的椭球面（图 13c），并发育大量擦痕。Suget_2 冰溜面呈纺锤形沿着山谷壁发育（图 13d、13e），其之上直接覆盖着重晶石扇发育的埃迪卡拉纪盖帽碳酸盐岩，后者呈波状起伏，厚约 3～4 cm，最底部于冰溜面之上为～1 cm 厚白云岩，再之上可见明显的刀片状重晶石以及 V 形的向上生长方向（图 13f、13g）。由于风化溶蚀作用，盖帽碳酸盐岩大部分脱落，只零星地残留在冰溜面表面，将发育丰富擦痕的冰溜面暴露在外。擦痕也只是发育在基底冰溜面表层部分出露的磨光面上（图 13h—13j），在磨光面之下的含细砾粗砂岩表面未见发育。对 Suget_2 冰溜面的擦痕一共测量了 20 组走向数据，平均值为 186°，同样指示着接近北—南的冰川运动方向。

组合 3 包括 Suget_3 和 Suget_4。Suget_3 为其中保存最完好、出露最明显的羊背石，整体为一上凸的流线型（图 14a—14b），擦痕为主要冰蚀形貌类型，包括平行或斜交擦痕和钉头刻痕等（图 14c、14f、14g、14i—14k），擦痕的深度和宽度均要强于尤尔美那克村的冰蚀形貌组合 1，一系列垂向或斜交发育的后期裂隙将擦痕截断。Suget_3 中多个贝壳状断口在近北—南方向上依次发育（图 14d、14e、14h），贝壳状断口朝北一侧的界面非常截然，朝南一侧的界面逐渐圆滑过渡。对 Suget_3 羊背石测量了 17 组擦痕走向数据，平均值为 211°，指示着北东—南西的冰川运动方向。

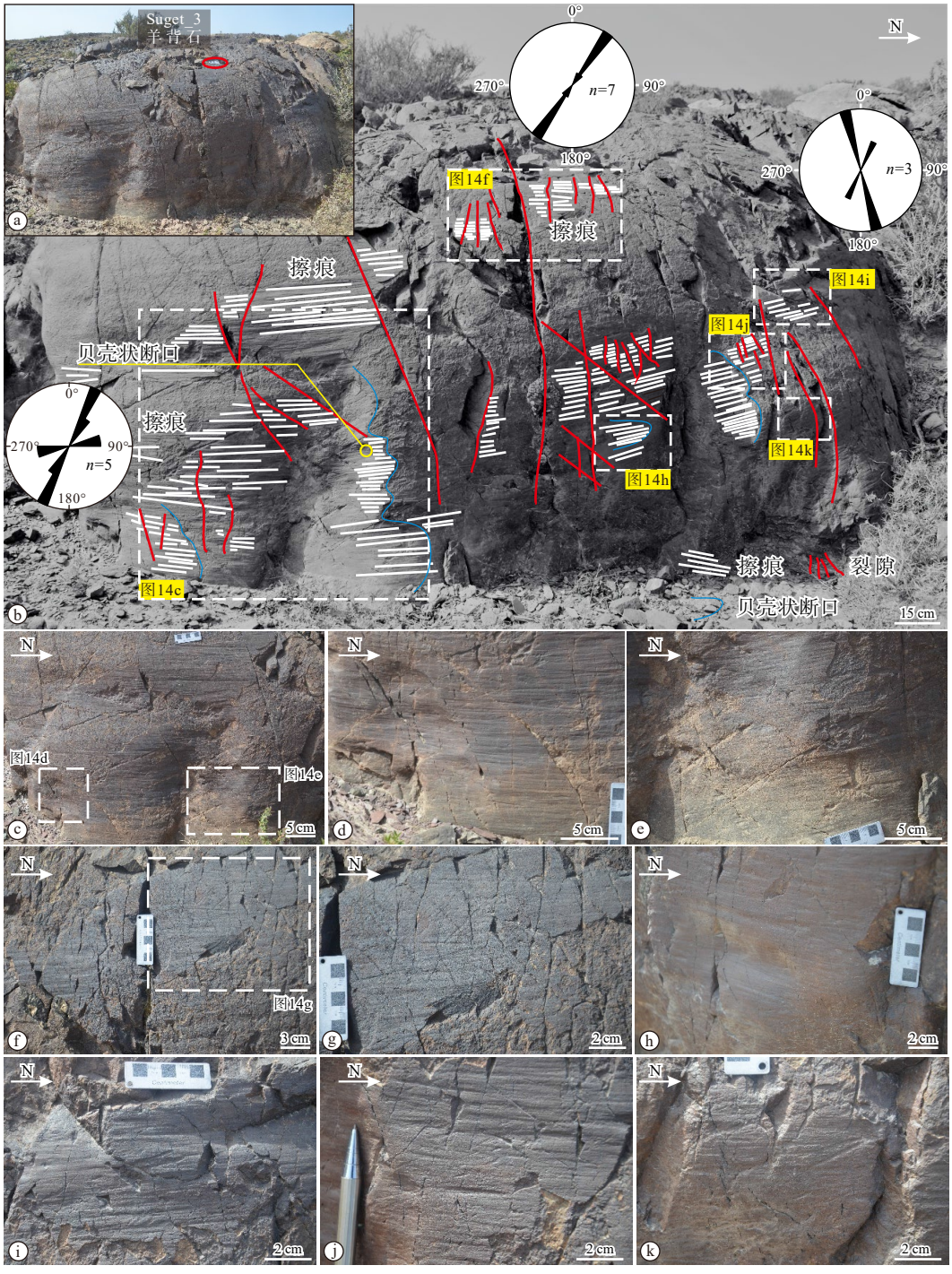
Suget_4 为散布在 Suget_3 西南的一系列冰蚀形貌小露头群，出露面积大小不一，以擦痕为主，擦痕的发育特征也类似于 Suget_2，即只发育在岩石表层部分出露、且具有较亮色泽磨光面上，共测量了 16 组擦痕走向数据，平均值为 213°。

从阿克苏—乌什地区的尤尔美那克村到苏盖特布拉克村，擦痕的走向总体上从北东—南西向和北—南向演变，擦痕在各个冰蚀形貌点均大量发育，然而，其他类型的中小尺度冰蚀形貌，尤其是塑性塑造形态表现出明显的空间分布和发育差异。低幅起伏的冰蚀面和沟渠状内凹槽在尤尔美那克村占主导地位，至苏盖特布拉克村过渡到以贝壳状断口为主。

2.2.4　冰蚀形貌对冰川运动的指示

根据规模和形态，在阿克苏—乌什地区主要发育 2 种尺度冰蚀形貌，即小型尺度的擦痕、钉头刻痕、发夹状擦痕、沟槽以及贝壳状断口、沟渠状内凹槽和起伏面等塑性塑造形貌，和中型尺度的羊背石，以上冰蚀形貌在每处冰蚀形貌点位上都显示出局部的变化。

擦痕走向趋势的总体变化表明，冰流的方向由北东至南西并略微向南蜿蜒。钉头刻痕的加宽方向表明，冰下裹挟的粗碎屑向前和向下犁动（Bennett and Glasser, 2009），最终突然停止在椭圆形的凿痕处。此外，发夹状擦痕和钉头擦痕受控于冰下粗碎屑的形状和基岩障碍物的存在，而塑性塑造形貌的大量发育表明大量的冰下融水在其形成的磨蚀过



a—Suget_3中型羊背石；b—羊背石上发育的冰蚀形貌；c—2处贝壳状断口；d—贝壳状断口放大图1；e—贝壳状断口放大图2；f—擦痕面；g—图14f的放大；h—发育有擦痕的贝壳状断口；i—平行擦痕，可见钉头刻痕；j—平行和斜交擦痕；k—平行和斜交擦痕

图14 塔西北阿克苏—乌什地区苏盖特布拉克村西北Suget_3中—小型冰蚀形貌（据Chen et al.，2025修改）

Fig. 14 The micro- and mesoscale glacial erosion forms of Suget_3 in the northwest of Sugetbrak village in the Aksu-Wushi area, northwestern Tarim (modified after Chen et al., 2025)

(a) Mesoscale roche moutonneé of Suget_3; (b) Glacial erosion forms developed on the roche moutonneé; (c) Two erosional forms of muschelbrüche; (d) Enlarged view of muschelbrüche(No.1); (e) Enlarged view of muschelbrüche(No.2); (f) striated surface; (g) Enlarged view of Fig. 14f; (h) Muschelbrüche with striations; (i) Parallel striations and nail-head striations; (j) Parallel and cross striations; (k) Parallel and cross striations

程中起着关键作用，是由具有底碛荷载或快速流动的融水流的暖底冰川在冰下环境中雕刻而成（Shaw and Kvill, 1984; Kor et al., 1991; Boulton et al., 1995; Eyles, 2006）。例如，在贝壳状断口的陡峭凸起的北侧和平滑的南侧可以指示从北至南的冰流运动方向；沟渠状内凹槽可以指示区域水力梯度的方向（Knight, 2009），该方向与冰流模式平行。塑性塑造形貌在空间上的变化，即从低幅起伏的冰蚀表面和沟渠状内凹槽向贝壳状断口的演变说明，冰下融水或冰川底床饱和水位引起的压力差（Gray, 1981; Shaw et al., 2020）以及融水分布、基质流变学（Le Heron et al., 2019b）和可能的后期差异风化对其空间保存产生了影响。羊背石与豫西罗圈组冰川形成的羊背石类似，具有同样的冰流方向指示意义。羊背石这种中型尺度的冰蚀形貌可以更加清晰地反映出冰川和基岩之间的关联，冰流的模式也能够更清晰地被观察到。

2.3　中国新元古代冰蚀形貌指示的冰川热体制和大地构造背景

中国新元古代成冰纪早期未见冰川侵蚀形貌的报道，其目前仅见于成冰纪晚期和埃迪卡拉纪，并可以在洲际范围追索。塔里木成冰纪尤尔美那克组和华北埃迪卡拉纪罗圈组之下发育的丰富冰蚀形貌、冰缘水系（冰水冲积平原，Chen et al., 2023, 2025）以及冰碛砾石形态均符合发育在低纬度地区的暖温大陆冰川的热体制特征（Hambrey and Glasser, 2012），并均指示着从北至南的冰川运动学规律。但相比尤尔美那克组，罗圈组的冰蚀形貌发育面积更加广泛且发育类型更丰富，例如，尤尔美那克组的冰溜面规模较小，除擦痕外，冰蚀形貌以贝壳状断口的塑性塑造形态和羊背石为主，而罗圈组的巨型冰溜面之上的塑性塑造形态在形态和尺寸上要更加丰富。可以推测这可能是由于从成冰纪到埃迪卡拉纪逐渐加强的暖温冰川热体制所导致；相应地，这是否响应着罗迪尼亚超大陆最后裂解并逐渐向冈瓦纳大陆聚汇时期特殊的大地构造背景，该时期全球广泛发育与大陆裂解有关的大火山岩省影响着大陆地壳（冰下底床）的热力学状态（柳永清等，2023），使得洲际性规模的冰蚀形貌得以形成（详见第三章节）。然而，新元古代成冰纪冰川从地球高纬度至低纬度地区均有发育（Li et al., 2013），而埃迪卡拉纪冰川是否为类似成冰纪的雪球地球模式（Chen et al., 2023; 柳永清等，2023），还是属于仅分布在高纬度的冰川（Wang et al., 2023）仍未有定论，因此以新元古代不同冰期的冰蚀形貌的异同性发育特征为切入点，开展深入剖析和对比，可望成为解决此重要科学问题的突破口。

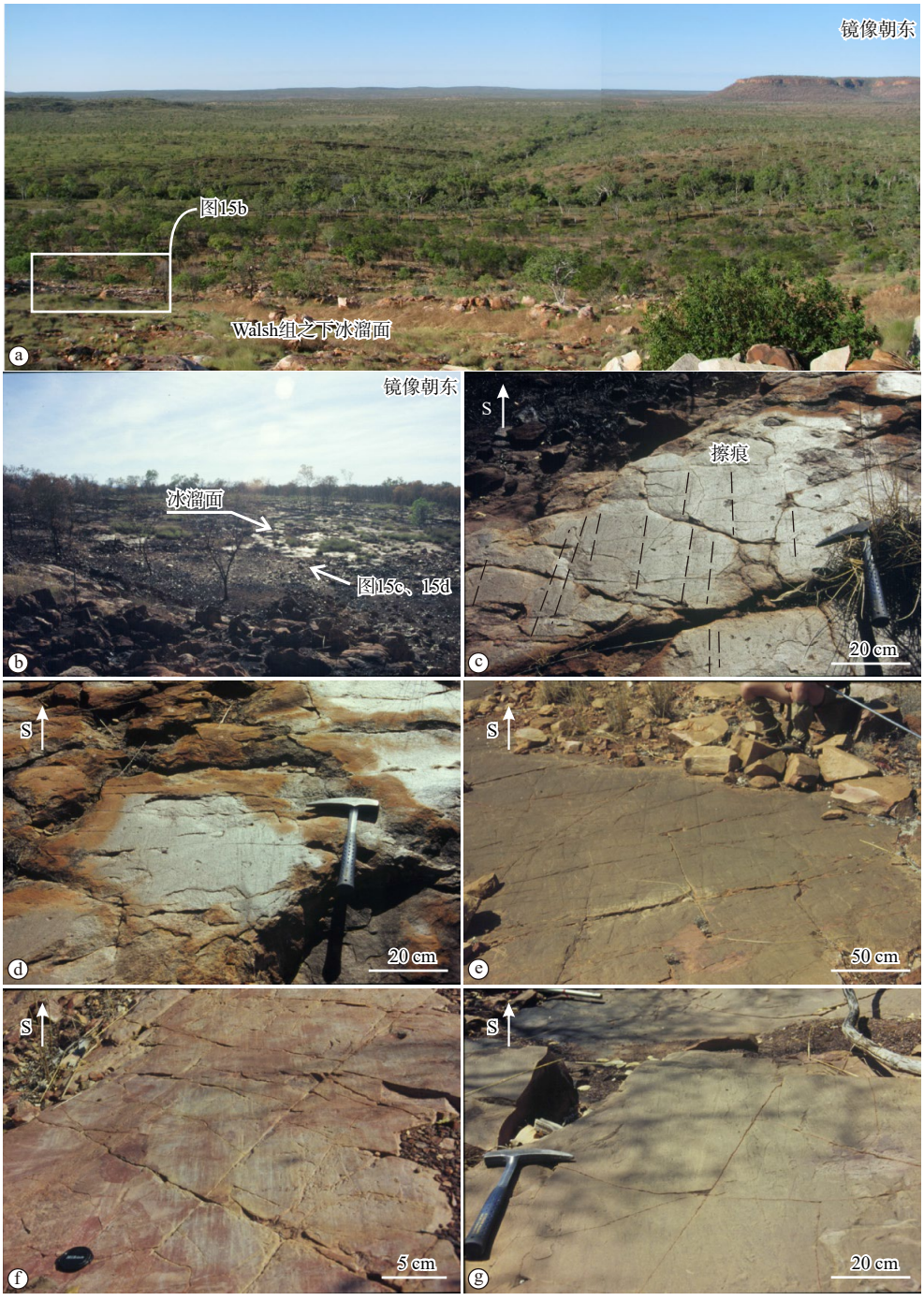
3　国际新元古代典型冰蚀形貌

新元古代成冰纪和埃迪卡拉纪的冰蚀形貌在全球各主要陆块均有分布，但却具有明显的时空不均一性，成冰纪早期的斯图特冰期（720～660 Ma）虽然延续时间较长，但冰蚀形貌记录寥寥无几，而成冰纪马雷诺冰期（650～635 Ma）和埃迪卡拉纪冰期（～580 Ma 和～565 Ma）虽然延续时间相对较短，但冰蚀形貌记录却极为丰富（Vandyk et al., 2021），且埃迪卡拉纪冰蚀形貌的规模更大、保存更完好且类型更丰富。

3.1　全球新元古代成冰纪典型冰蚀形貌

全球范围内，以冰溜面为代表的新元古代成冰纪冰蚀形貌在波罗的、劳伦、澳大利亚、印度、圣弗朗西斯科、西非和塔里木等 7 个陆块发育（Vandyk et al., 2021）。通常认为斯图特冰期仅存在 1 个无争议的冰溜面，发现于劳伦古陆的 Mineral Fork 组（Ojakangas and Matsch, 1980; Christie-Blick, 1983; Yonkee et al., 2014）。相比之下，上述陆块均存在马雷诺冰期的冰蚀形貌：①澳大利亚，Walsh 组、Landrigan 组、Fargoo/Moonlight Valley 组（Corkeron, 2011）；②波罗的，挪威 Smalfjord 组（Laajoki, 2002）；③印度，Blaini 组（Etienne et al., 2011）；④劳伦，格陵兰 Tillite 群的 Ulveso 组和 Storeelv 组（Moncrieff and Hambrey, 1988）；⑤圣弗朗西斯科，巴西，Bebedouro 组（Montes et al., 1985）；Jequitai 组（Uhlein et al., 2011）；⑥西非，Jbéliat 群（Shields-Zhou et al., 2011）；⑦塔里木，尤尔美那克组（Chen et al., 2025）。由此可见，成冰纪马雷诺冰期相比斯图特冰期持续时间更短但是冰蚀形貌的证据更确凿且分布更广，均发育着指示冰川作用以及冰川运动规律的冰溜面。例如，格陵兰中东部 Tillite 群的 Ulveso 组和 Storeelv 组内部和下部均发育以弯曲的小型非对称沟槽和发育擦痕的砾石铺盖层为主的形貌（Moncrieff and Hambrey, 1988）。印度北部 Blaini 组底部冰碛岩之下发育的冰溜面上可见多组交错擦痕（Etienne et al., 2011）。西非 Jbéliat 群冰碛岩之下同样发育冰溜面和羊背石（Shields-Zhou et al., 2011）。相比之下，巴西东部 Bebedouro 组之下冰溜面风化严重，表面的冰蚀形貌目前已无法详细分辨（Montes et al., 1985）。澳大利亚西北部

Kimbery地区Walsh组之下冰溜面自Perry and Robert（1968）首次报道后少有研究，后来Corkeron（2002）和Corkeron（2008）描述了冰溜面上发育的密集擦痕（图15），Le Heron et al.（2022）根据卫星图识别出了古冰蚀谷和由北向南或向南西的冰川运动方向（Corkeron, 2011）。



a—Walsh组之下冰溜面全景；b—图15a中冰溜面放大；c—发育擦痕的冰溜面1；d—发育擦痕的冰溜面2；e—冰溜面上部分擦痕延伸较短；f—擦痕密集排列；g—斜交擦痕发育

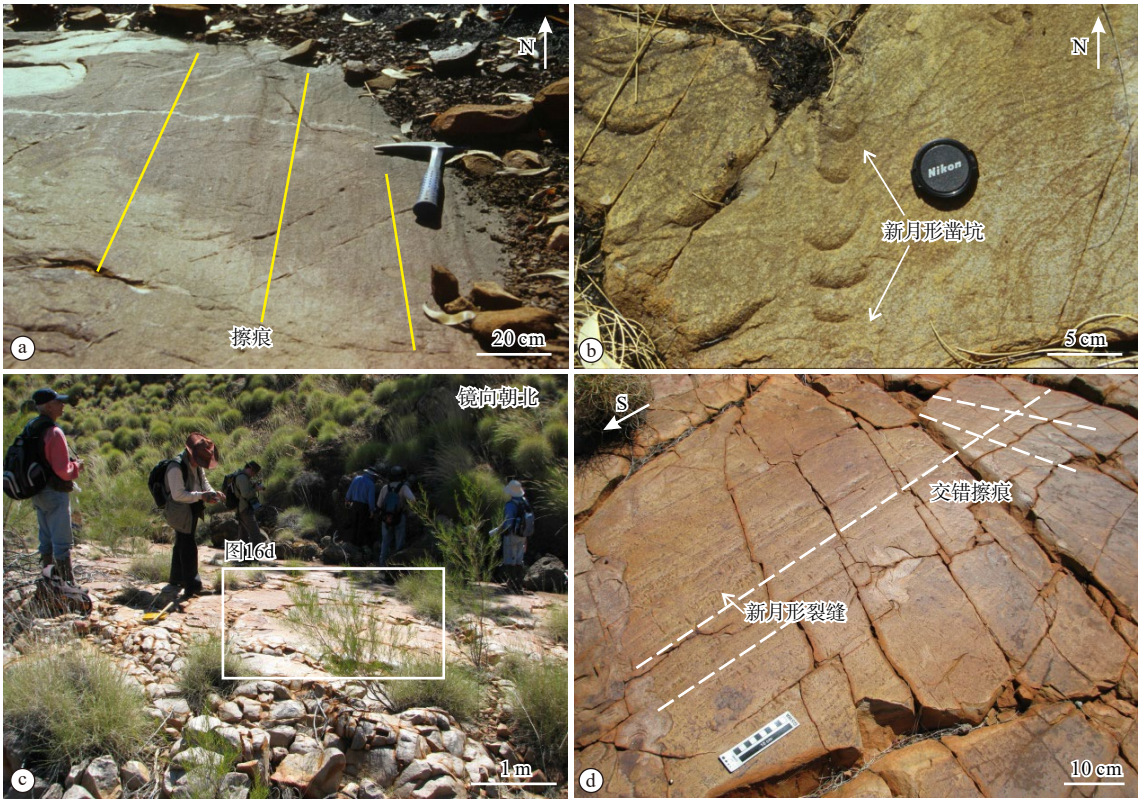
图15 澳大利亚西北Kimberley地区Walsh组之下以擦痕为主的冰蚀形貌（照片由Maree Corkeron提供）

Fig. 15 Striation-dominated glacial erosion forms underlying the Walsh Formation in the Kimberley region, northwestern Australia (photos courtesy of Maree Corkeron)

(a) Panorama of the pavements beneath the Walsh Formation; (b) Enlarged view of the pavement in Fig. 15a; (c) Striated pavement(No.1); (d) Striated pavement(No.2); (e) Some striations of the pavement extend relatively short ; (f) Densely packed striations; (g) Cross striations

3.2　全球新元古代埃迪卡拉纪典型冰蚀形貌

不同尺度的新元古代埃迪卡拉纪冰蚀形貌同样在全球几大陆块被报道，如澳大利亚（Corkeron and George, 2001）、西非（Germs and Gaucher, 2012; Vernhet et al., 2012; Letsch et al., 2018）、巴西（de Alvarenga et al., 2007）、伊朗（Etemad-Saeed et al., 2016）和华北克拉通（Le Heron et al., 2019b; Chen et al., 2020）等。伊朗北部的 Kahar 组巨厚的碎屑岩系底部发育～3 m 厚的冰碛岩，其下伏局部砂岩表面发育冰溜面（Etemad-Saeed et al., 2016）。在亚马逊克拉通东南缘的巴拉圭造山带的 Serra Azul 组与之下 Araras 群白云岩之间的地貌体现为大规模冰蚀深切 V 形峡谷和磨光面（McGee et al., 2013）。澳大利亚北部 Kimberley 地区 Egan 组之下的冰溜面上发育以擦痕（包括交叉擦痕）以及新月形裂隙和凹坑为主的小型尺度冰蚀形貌（图 16; Corkeron and George, 2001）。新月形裂隙和凹坑的方向明确地指示冰川的运动学规律为从北/西北向南/东南，为重建澳大利亚西北地区该时期冰川的空间分布与推进方向提供了直接线索。



a—擦痕发育的冰溜面；b—新月形凹坑；c—Egan 组之下冰溜面宏观照；d—发育擦痕的冰溜面之上的新月形裂缝

图 16　澳大利亚西北 Kimberley 地区 Egan 组之下以擦痕和新月形凹坑、裂缝为主的冰蚀形貌（照片由 Maree Corkeron 提供）

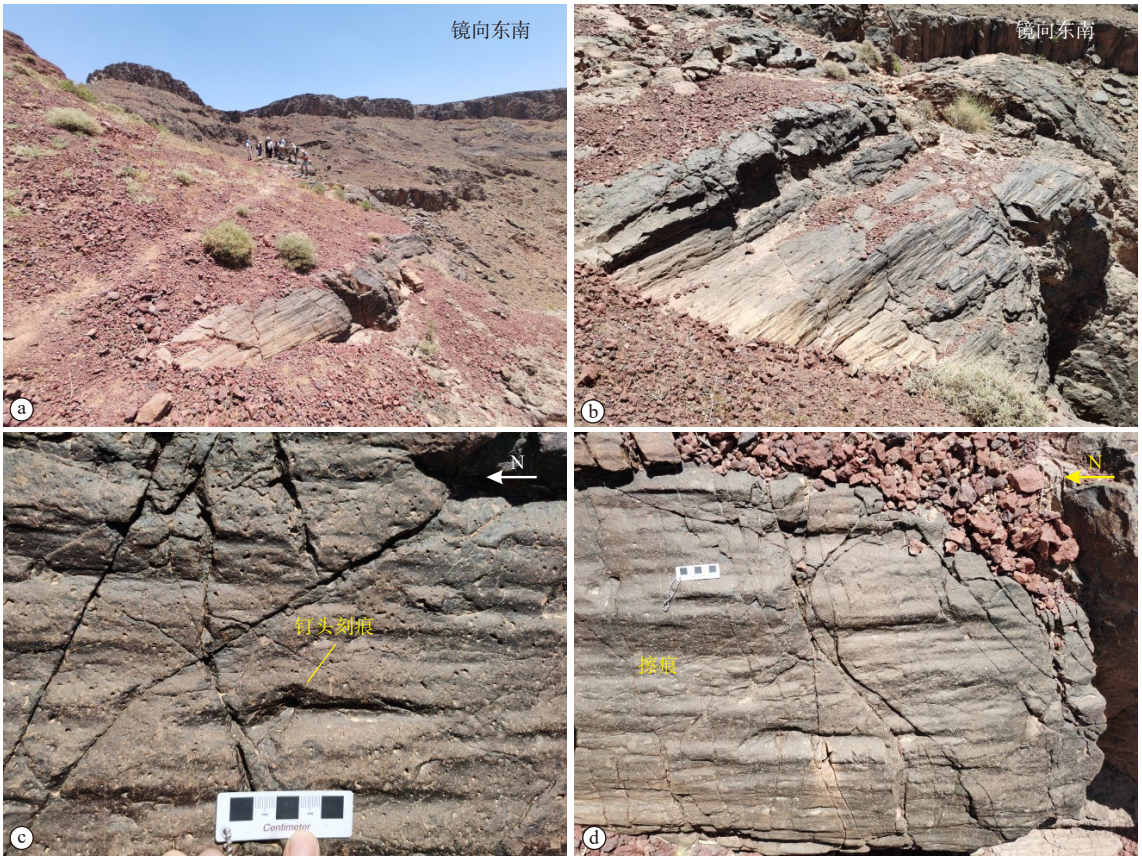
Fig. 16　Striation and crescentic cracks or fractures dominated glacial erosion forms beneath the Egan Formation in the Kimberley region, northwestern Australia (photos courtesy of Maree Corkeron)

(a) Striated pavements; (b) Crescentic gouges; (c) Macroscopic photograph of the pavement underlying the Egan Formation; (d) Crescentic fractures developed on the striated pavement

西非摩洛哥 Anti-Atlas 地区的埃迪卡拉纪 Bou Azzer 组冰川沉积发育于 Tiddiline 群之上的 Ourazazate 群顶部，时代上（～560 Ma; Karaoui et al., 2015; Letsch et al., 2019）要年轻于埃迪卡拉纪 Gaskiers组冰碛岩（～580 Ma）。在 Bou Azzer Tazegzaout 出露的 Ourazazate 群为火山碎屑岩夹多层流纹岩，在流纹岩的顶面观察到若干处面积均为小于 10 m^2 的小型棕红色冰溜面或羊背石，其上发育的擦痕、沟槽和钉头刻痕等指示冰川运动方向为由南向北（图 17）。

4　结束语

冰川侵蚀作用和冰蚀形貌研究经历了百余年的历史积淀，取得了丰富的成果和进展。从厚度和



a—Bou Azzer组之下羊背石宏观照；b—羊背石放大照片；c—钉头刻痕；d—擦痕面

图17 摩洛哥Anti-Atlas地区Bou Azzer组之下擦痕发育的小型羊背石

Fig. 17 Small-scale roche moutonnée beneath the Bou Azzer Formation in the Anti-Atlas region, Morocco

(a) Macroscopic photograph of the roche moutonnée underlying the Bou Azzer Formation; (b) Enlarged view of the roche moutonnée; (c) Nailhead striae; (d) Striated surface

分布范围来看，冰下过程和沉积物在冰川覆盖的大陆和海洋中占主导地位。冰川侵蚀形貌的空间分析是古冰川重建的关键，也是冰川地表景观中的残留线索，借助冰蚀形貌能够反映古冰盖的规模、形态、动力学特征及演化历史。然而，冰川侵蚀和沉积过程十分复杂，虽然可以从活跃的冰下环境中保留的侵蚀痕迹中推断冰川的侵蚀—搬运过程，但学界对冰下环境及其过程和冰蚀形貌的了解尚不完整，这是由于冰下环境较难以接近、无法直接观察其中的过程，而且与深时冰下环境相似的现代实例也很有限。因此，目前深时古冰川侵蚀形貌的研究大多局限于例如冰川热体制研究，古冰体垂直范围的重建研究以及冰川运动规律的研究。其中，热体制作为冰川最重要的指标之一，其所代表的不同类型冰川（暖温冰川、极地冰川和冷温复合冰川）会具有不同的砾石结构、岩石组合、沉积相和冰川沉积演化模式，使得从冰川热体制和运动学规律的角度为深时冰川古地理重建提供了可能。塔西北成冰纪尤尔美那克组之下丰富的冰蚀形貌类型指示着自北向南运动的温带冰川，澳大利亚成冰纪Walsh组具有与其一致的冰流方向和沉积演化规律，因此暗示着塔里木和澳大利亚在成冰纪相邻且同处于低纬度。关于全球埃迪卡拉纪冰川的古地理重建，不同意见集中在属性和发育期次，即埃迪卡拉纪冰川是一次连续发育的区域性山岳冰川，还是多期次幕式发育的全球性大陆冰盖；此外，如前所述，埃迪卡拉纪冰川在全球范围内同样发育有不同尺度的丰富冰蚀形貌，其形成机制和内在驱动力与罗迪尼亚超大陆最终裂解，或与冈瓦纳超大陆汇聚时期特殊的大地构造背景如何关联也尚待更深入研究；同时，埃迪卡拉纪冰川的存在还对于原特提斯洋是从罗迪尼亚超大陆裂解到早古生代一直存在，还是早古生代以后才开启等重要科学问题具有重要意义。因此，有关深时冰川，特别是埃迪卡

拉纪冰川侵蚀形貌的空间分析、定性与定量研究，以及与成冰纪以至和古生代冰川侵蚀形貌的对比研究有待深入挖掘，这或许可以成为未来前寒武纪冰川古地理重建研究中的新增长点。

另一方面，与激光雷达等在现代/更新世冰川的应用相比，这些技术在深时冰川形貌研究中的应用尚处于起步阶段，但具有巨大的应用价值和研究潜力。通过将高清卫星图像、无人机航拍、数字高程模型与传统野外观测相结合，能更清晰地理解冰溜面以及一系列冰蚀形貌和冰川融水系统的特征，从而使得古冰川动力学的定性与定量重建成为可能。因此，对深时冰川侵蚀形貌采取多学科手段交叉研究，可以进一步了解冰川侵蚀–搬运–沉积作用的历史变迁，包括冰进–冰退作用的旋回、冰期和间冰期的交替，以及宜居地球背景下的全球气候变化与冰川作用的关系。

致谢：感谢评审专家的宝贵意见和建议，感谢主编和编辑的审稿意见和辛苦劳动，极大地提高了本文的科学严谨性。

References

ALLEY R B, CUFFEY K M, ZOET L K, 2019. Glacial erosion: status and outlook[J]. Annals of Glaciology, 60(80): 1-13.

ANDREWS E, 1883. Glacial markings of unusual forms in the Laurentian Hills[J]. American Journal of Science, S3-26(152): 99-105.

ATKINSON B K, 1984. Subcritical crack growth in geological materials[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 89(B6): 4077-4114.

BENN D I, EVANS D J A, 2010. Glaciers and glaciation[M]. 2nd ed. London: Routledge: 1-802.

BENNETT M R, 2003. Ice streams as the arteries of an ice sheet: their mechanics, stability and significance[J]. Earth-Science Reviews, 61(3-4): 309-339.

BENNETT M R, GLASSER N F, 2009. Glacial geology: ice sheets and landforms[M]. 2nd ed. Oxford: Wiley-Blackwell: 1-385.

BOULTON G S, 1974. Processes and patterns of glacial erosion[C]//COATES D R. Glacial geomorphology. Dordrecht: Springer: 41-87.

BOULTON G S, 1979. Processes of glacier erosion on different substrata[J]. Journal of Glaciology, 23(89): 15-38.

BOULTON G S, 1996. Theory of glacial erosion, transport and deposition as a consequence of subglacial sediment deformation[J]. Journal of Glaciology, 42(140): 43-62.

BOULTON G S, CABAN P E, VAN GIJSSEL K, 1995. Groundwater flow beneath ice sheets: part I: large scale patterns[J]. Quaternary Science Reviews, 14(6): 545-562.

BOULTON G S, DONGELMANS P, PUNKARI M, et al., 2001. Palaeoglaciology of an ice sheet through a glacial cycle: the European ice sheet through the Weichselian[J]. Quaternary Science Reviews, 20(4): 591-625.

BRAAKMAN J H, LEVELL B K, MARTIN J H, et al., 1982. Late Palaeozoic Gondwana glaciation in Oman[J]. Nature, 299(5878): 48-50.

CHAMBERLIN T C, 1888. The rock scourings of the great ice invasions[M]//POWELL J W. Seventh Annual report of the United States Geological Survey to the Secretary of the Interior. Washington: U. S. Geological Survey: 155-248.

CHANDLER B M P, LOVELL H, BOSTON C M, et al., 2018. Glacial geomorphological mapping: a review of approaches and frameworks for best practice[J]. Earth-Science Reviews, 185: 806-846.

CHEN X S, KUANG H W, LIU Y Q, et al., 2020. Subglacial bedforms and landscapes formed by an ice sheet of Ediacaran-Cambrian age in West Henan, North China[J]. Precambrian Research, 344: 105727.

CHEN X S, KUANG H W, LIU Y Q, et al., 2023. Sedimentary characteristics and evolution of Ediacaran glaciation in western Henan Province, southern North China Craton[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 632: 111866.

CHEN X S, KUANG H W, LIU Y Q, et al., 2025. Dynamics of Marinoan-age glaciers in NW Tarim, China[J]. Precambrian Research, 430: 107933.

CHRISTIE-BLICK N, 1983. Glacial-marine and subglacial sedimentation Upper Proterozoic Mineral Fork Formation, Utah[M]//MOLNIA B F. Glacial-marine sedimentation. Boston: Springer: 703-776.

CORKERON M, 2008. Deposition and palaeogeography of a glacigenic Neoproterozoic succession in the east Kimberley, Australia[J]. Sedimentary Geology, 204(3-4): 61-82.

CORKERON M, 2011. Neoproterozoic glacial deposits of the Kimberly region and northwestern northern Territory, Australia[M]//ARNAUD E, HALVERSON G P, SHIELDS-ZHOU G. The geological record of Neoproterozoic glaciations. London: Geological Society of London: 659-672.

CORKERON M L, GEORGE A D, 2001. Glacial incursion on a Neoproterozoic carbonate platform in the Kimberley region, Australia[J]. GSA Bulletin, 113(9): 1121-1132.

CORKERON M L, 2002. Neoproterozoic glacial events in the Kimberley Region, western Australia: sedimentology and regional correlation in the context of continental-and global-scale Neoproterozoic glaciation[D]. Crawley: the University of Western Australia: 1-380.

DAHL R, 1965. Plastically sculptured detail forms on rock surfaces in northern Nordland, Norway[J]. Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography, 47(2): 83-140.

DE ALVARENGA C J S, FIGUEIREDO M F, BABINSKI M, et al., 2007. Glacial diamictites of Serra Azul Formation (Ediacaran, Paraguay belt): evidence of the Gaskiers glacial event in Brazil[J]. Journal of South American Earth Sciences, 23(2-3): 236-241.

DEMOREST M, 1938. Ice flowage as revealed by glacial striae[J]. The Journal of Geology, 46(5): 700-725.

DÜHNFORTH M, ANDERSON R S, WARD D, et al., 2010. Bedrock fracture control of glacial erosion processes and rates[J]. Geology, 38(5): 423-426.

ETEMAD-SAEED N, HOSSEINI-BARZI M, ADABI M H, et al., 2016. Evidence for ca. 560 Ma Ediacaran glaciation in the Kahar Formation, central Alborz Mountains, northern Iran[J]. Gondwana Research, 31: 164-183.

ETIENNE J L, ALLEN P A, LE GUERROUÉ E, et al. , 2011. The Blaini formation of the Lesser Himalaya, NW India[M]//ARNAUD E, HALVERSON G P, SHIELDS-ZHOU G. The geological record of Neoproterozoic glaciations. London: Geological Society of London: 347-355.

EYLES N, 2006. The role of meltwater in glacial processes[J]. Sedimentary Geology, 190(1-4): 257-268.

EYLES N, PUTKINEN N, SOOKHAN S, et al., 2016. Erosional origin of drumlins and megaridges[J]. Sedimentary Geology, 338: 2-23.

FORBES E, 1843. Travels through the Alps of Savoy and Other Parts of the Pennine Chain: With Observations on the Phenomena of Glaciers[M]. Edinburgh: Adam and Charles Black: 1-424.

GAO Z J, LI Y A, QIAN J X, et al., 1982. New data of the Sinian glacial deposits in Aksu-Kalpin region, Xinjiang Uygur Zizhiqu[J]. Bulletin Tianjin institute Geol. Min. Res, 5: 43-56. (in Chinese with English abstract)

GERMS G J B, GAUCHER C, 2012. Nature and extent of a late Ediacaran (ca. 547 Ma) glacigenic erosion surface in southern Africa[J]. South African Journal of Geology, 115(1): 91-102.

GLASSER N F, BENNETT M R, 2004. Glacial erosional landforms: origins and significance for palaeoglaciology[J]. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 28(1): 43-75.

GRAY J M, 1981. P-forms from the isle of mull[J]. Scottish Journal of Geology, 17(1): 39-47.

GUAN B D, WU R T, HAMBREY M J, et al., 1986. Glacial sediments and erosional pavements near the Cambrian-Precambrian boundary in western Henan Province, China[J]. Journal of the Geological Society, 143(2): 311-323.

GUAN B D, GENG W C, RONG Z Q, et al. , 1988. The Middle and Upper Proterozoic in the northern slope of Eastern Qinling ranges, Henan, China[M]. Zhengzhou: Henan Science and Technology Press: 1-210. (in Chinese with English abstract)

HALLET B, 1979. A theoretical model of glacial abrasion[J]. Journal of Glaciology, 23(89): 39-50.

HALLET B, 1996. Glacial quarrying: a simple theoretical model[J]. Annals of Glaciology, 22: 1-8.

HAMBREY M J, GLASSER N F, 2012. Discriminating glacier thermal and dynamic regimes in the sedimentary record[J]. Sedimentary Geology, 251-252: 1-33.

HILDES D H D, CLARKE G K C, FLOWERS G E, et al., 2004. Subglacial erosion and englacial sediment transport modelled for North American ice sheets[J]. Quaternary Science Reviews, 23(3-4): 409-430.

HINDMARSH R C A, 1996. Sliding of till over bedrock: scratching, polishing, comminution and kinematic-wave theory[J]. Annals of Glaciology, 22: 41-47.

HUGHES A L C, CLARK C D, JORDAN C J, 2010. Subglacial bedforms of the last British Ice Sheet[J]. Journal of Maps, 6(1): 543-563.

IVERSON N R, 1991. Morphology of glacial striae: implications for abrasion of glacier beds and fault surfaces[J]. GSA Bulletin, 103(10): 1308-1316.

IVERSON N R, 1995. Processes of erosion[M]//MENZIES J. Modern glacial environments: processes, dynamics and sediments. Oxford: Butterworth-Heinemann: 241-259.

JANSSON K N, KLEMAN J, MARCHANT D R, 2002. The succession of ice-flow patterns in north-central Québec-Labrador, Canada[J]. Quaternary Science Reviews, 21(4-6): 503-523.

KARAOUI B, BREITKREUZ C, MAHMOUDI A, et al., 2015. U–Pb zircon ages from volcanic and sedimentary rocks of the Ediacaran Bas Draâ inlier (Anti-Atlas Morocco): chronostratigraphic and provenance implications[J]. Precambrian Research, 263: 43-58.

KEHEW A E, PIOTROWSKI J A, JØRGENSEN F, 2012. Tunnel valleys: concepts and controversies: a review[J]. Earth-Science Reviews, 113(1-2): 33-58.

KLEMAN J, 1990. On the use of glacial striae for reconstruction of paleo-ice sheet flow patterns: with application to the Scandinavian ice sheet[J]. Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography, 72(3-4): 217-236.

KLEMAN J, BORGSTRÖM I, 1996. Reconstruction of palaeo-ice sheets: the use of geomorphological data[J]. Earth surface Processes and Landforms, 21(10): 893-909.

KNIGHT J, 2009. Subglacial erosion forms in northwest Ireland[J]. Boreas, 38(3): 545-554.

KOR P S G, SHAW J, SHARPE D R, 1991. Erosion of bedrock by subglacial meltwater, Georgian Bay, Ontario: a regional view[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 28(4): 623-642.

KRABBENDAM M, EYLES N, PUTKINEN N, et al., 2016. Streamlined hard beds formed by palaeo-ice streams: a review[J]. Sedimentary Geology, 338: 24-50.

KUANG H, CHEN X, LIU Y, et al. , 2024. Discover the glacial world on the eve of the Cambrian life explosion: the Ediacaran-Early Cambrian glaciation in the west of Henan Province, North China[M]//HU X M. Field trip guidebook on Chinese sedimentary geology. Singapore: Springer: 425-514.

LAAJOKI K, 2002. New evidence of glacial abrasion of the Late Proterozoic unconformity around Varangerfjorden, northern Norway[M]//ALTERMANN W, CORCORAN P L. Precambrian sedimentary environments: a modern approach to ancient depositional systems. Oxford: Blackwell Science: 405-436.

LAWSON T J, 1996. Glacial striae and former ice movement: the evidence from Assynt, Sutherland[J]. Scottish Journal of Geology, 32(1): 59-65.

LE HERON D P, VANDYK T M, WU G H, et al., 2018. New perspectives on the Luoquan glaciation (Ediacaran-Cambrian) of North China[J]. The Depositional Record, 4(2): 274-292.

LE HERON D P, DIETRICH P, BUSFIELD M E, et al., 2019a. Scratching the surface: footprint of a late Carboniferous ice sheet[J]. Geology, 47(11): 1034-1038.

LE HERON D P, VANDYK T M, KUANG H W, et al., 2019b. Bird's-eye view of an Ediacaran subglacial landscape[J]. Geology, 47(8): 705-709.

LE HERON D P, BUSFIELD M E, CHEN X, et al., 2022. New perspectives on glacial geomorphology in Earth's deep time record[J]. Frontiers in Earth Science, 10: 870359.

LEE J S, 1940. A summary of Quaternary glacial phenomena in western Hubei, eastern Sichuan, western Hunan and northern Guangxi[J]. Geological Review, 5(3): 171-184 (in Chinese).

LETSCH D, LARGE S J E, BUECHI M W, et al., 2018. Ediacaran glaciations of the west African Craton: evidence from Morocco[J]. Precambrian Research, 310: 17-38.

LETSCH D, LARGE S J E, BERNASCONI S M, et al., 2019. Northwest Africa's Ediacaran to early Cambrian fossil record, its oldest metazoans and age constraints for the basal Taroudant Group (Morocco)[J]. Precambrian Research, 320: 438-453.

LI Z X, EVANS D A D, HALVERSON G P, 2013. Neoproterozoic glaciations in a revised global palaeogeography from the breakup of Rodinia to the assembly of Gondwanaland[J]. Sedimentary Geology, 294: 219-232.

LIU Y Q, KUANG H W, CHEN X S, et al., 2023. Ediacaran diamictites and glaciation in northern China[J]. Acta Geologica Sinica, 97(12): 3984-

4005. (in Chinese with English abstract)

LU L H, HAN Y G, ZHAO G C, et al., 2024. Depositional processes of Marinoan-age diamictites and cap carbonates in northwestern Tarim, China: implications for chemical weathering following the Marinoan deglaciation[J]. GSA Bulletin, 136(5-6): 2443-2459.

LU S N, GAO Z J, 1990. A comparative study on the characteristics of debris flow and glacial deposits of late Proterozoic in the akso area of Xinjiang[J]. Bulletin of the 562 comprehensive geological brigade, Chinese Academy of Geological Sciences, 9: 1-16. (in Chinese)

LU S N, GAO Z J, 1994. Neoproterozoic tillite and tilloid in the Aksu area, Tarim Basin, Uygur Xinjiang autonomous region, Northwest China[M]//DEYNOUX M, MILLER J M G, DOMACK E W, et al. Earth's glacial record. Cambridge: Cambridge University Press: 95-100.

LUNDQVIST J, 2020. Glacial morphology as an indicator of the direction of glacial transport[M]//KUJANSUU R, SAARNISTO S M. Glacial indicator tracing. London: CRC Press: 61-70.

MATTHES F E, 1930. Geologic history of the Yosemite Valley[R]. Washington: United States Government Printing Office: 1-137.

MATTSSON Å, 1997. Glacial striae, glacigenous sediments and Weichselian ice movements in southernmost Sweden[J]. Sedimentary Geology, 111(1-4): 285-311.

MC CABE A M, 1998. Striae at St. Mullin's Cave, County Kilkenny, southern Ireland: their origin and chronological significance[J]. Geomorphology, 23(1): 91-96.

MCGEE B, COLLINS A S, TRINDADE R I F, 2013. A glacially incised canyon in Brazil: further evidence for mid-Ediacaran glaciation?[J]. The Journal of Geology, 121(3): 275-287.

MENZIES J, VAN DER MEER J J M, SHILTS W W, 2018. Subglacial processes and sediments[M]//MENZIES J, VAN DER MEER J J M. Past glacial environments. Amsterdam: Elsevier: 1-835.

MONCRIEFF A C M, HAMBREY M J, 1988. Late Precambrian glacially-related grooved and striated surfaces in the Tillite Group of central East Greenland[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 65(3-4): 183-200.

MONTES A S L, GRAVENOR C P, MONTES M L, 1985. Glacial sedimentation in the late Precambrian Bebedouro formation, Bahia, Brazil[J]. Sedimentary Geology, 44(3-4): 349-358.

MU Y J, 1981. Luoquan Tillite of the Sinian System in China[M]//HAMBREY M J, HARLAND W B. Earth's Pre-Pleistocene Glacial Record. Cambridge: Cambridge University Press: 402-441.

MU Y J, 1983. Origin and age of the glacial moraines in the Luoquan Formation[J]. Henan Geology, 1(2): 35-46. (in Chinese)

NEWTON M, EVANS D J A, ROBERTS D H, et al., 2018. Bedrock megagrooves in glaciated terrain: a review[J]. Earth-Science Reviews, 185: 57-79.

OJAKANGAS R W, MATSCH C L, 1980. Upper Precambrian (Eocambrian) Mineral Fork Tillite of Utah: a continental glacial and glaciomarine sequence[J]. GSA Bulletin, 91(8): 495-501.

OSTOJIC P, MCPHERSON R, 1987. A review of indentation fracture theory: its development, principles and limitations[J]. International Journal of Fracture, 33(4): 297-312.

PERRY W J, ROBERTS H G, 1968. Late Precambrian glaciated pavements in the Kimberley region, western Australia[J]. Journal of the Geological Society of Australia, 15(1): 51-56.

REA B R, EVANS D J A, DIXON T S, et al., 2000. Contemporaneous, localized, basal ice-flow variations: implications for bedrock erosion and the origin of p-forms[J]. Journal of Glaciology, 46(154): 470-476.

SHARPE D R, SHAW J, 1989. Erosion of bedrock by subglacial meltwater, Cantley, Quebec[J]. GSA Bulletin, 101(8): 1011-1020.

SHAW J, KVILL D, 1984. A glaciofluvial origin for drumlins of the Livingstone Lake area, Saskatchewan[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 21(12): 1442-1459.

SHAW J, 1994. Hairpin erosional marks, horseshoe vortices and subglacial erosion[J]. Sedimentary Geology, 91(1-4): 269-283.

SHAW J, GILBERT R G, SHARPE D R, et al., 2020. The origins of s-forms: form similarity, process analogy, and links to high-energy, subglacial meltwater flows[J]. Earth-Science Reviews, 200: 102994.

SHI Y F, REN B H, XIE Z C, 1979. Progress of China's glaciological research over the past thirty years[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1(2): 1-6. (in Chinese)

SHI Y F, REN B H, 1983. A short history on glaciological research in China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 5(1): 21-31. (in Chinese with English abstract)

SHIELDS-ZHOU G A, DEYNOUX M, OCH L, 2011. The record of Neoproterozoic glaciation in the Taoudéni Basin, NW Africa[M]//ARNAUD E, HALVERSON G P, SHIELDS-ZHOU G. The geological record of Neoproterozoic glaciations. London: Geological Society of London: 163-171.

SUGDEN D E, JOHN B S, 1976. Glaciers and landscape[M]. London: Edward Arnold: 1-376.

UHLEIN A, ALVARENGA C J S, DARDENNE M A, et al. , 2011. The glaciogenic Jequitaí Formation, southeastern Brazil[M]//ARNAUD E, HALVERSON G P, SHIELDS-ZHOU G. The geological record of Neoproterozoic glaciations. London: Geological Society of London: 541-546.

VANDYK T M, WU G, DAVIES B J, et al., 2019. Temperate glaciation on a Snowball Earth: glaciological and palaeogeographic insights from the Cryogenian Yuermeinak Formation of NW China[J]. Precambrian Research, 331: 105362.

VANDYK T M, KETTLER C, DAVIES B J, et al., 2021. Reassessing classic evidence for warm-based Cryogenian ice on the western Laurentian margin: the "striated pavement" of the Mineral Fork Formation, USA[J]. Precambrian Research, 363: 106345.

VERNHET E, YOUBI N, CHELLAI E H, et al. , 2012. The Bou-Azzer glaciation: evidence for an Ediacaran glaciation on the west African craton (anti-atlas, Morocco)[J]. Precambrian Research, 196-197: 106-112.

WANG M, WANG M, ZHAO Z Z, et al., 2022. Investigation method of Quaternary glacial geoheritage in China[J]. Geological Review, 68(2): 1530-1540. (in Chinese with English abstract)

WANG N A, LIU X, CHENG H Y, et al., 2022. On glacial chatter mark[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 44(4): 1319-1336. (in Chinese with English abstract)

WANG R M, YIN Z J, SHEN B, 2023. A late Ediacaran ice age: the key node in the Earth system evolution[J]. Earth-Science Reviews, 247: 104610.

WARREN H A, 1928. Survey of the Life of Louis Agassiz the Centenary of the Glacial Theory[J]. The Scientific Monthly, 27(4): 355-366.

WU R T, GUAN B D, 1988. Glacigenic characteristics of the Luoquan formation and sediment gravity flow reworking on it[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 1(3): 325-339.

WU R T, GUAN B D, 1988. On the glacigene characteristics of the Luoquan-formation and its reworking by gravity flows[J]. Acta GeologicaSinica,

62(1): 78-89. (in Chinese with English abstract)

YANG Y Q, WU R T, 1992. Underlying paleo ice erosion surface and ice erosion structure of Luoquan Formation in western Henan[J]. Hennan Geology, 10(4): 282-285. (in Chinese)

YE G, 1984. Geological investigation of Luoquan Formation[J]. Geological Science and Technology Information(1): 69-71. (in Chinese)

YONKEE W A, DEHLER C D, LINK P K, et al., 2014. Tectono-stratigraphic framework of Neoproterozoic to Cambrian strata, west-central U. S. : protracted rifting, glaciation, and evolution of the North American Cordilleran margin[J]. Earth-Science Reviews, 136: 59-95.

ZHANG B Y, ZHENG D S, 2022. Sedimentological, geochemical, and geochronological constraints on the origin of the Neoproterozoic Luoquan Formation at the southern margin of the North China Craton[J]. International Geology Review, 64(7): 911-932.

ZHENG Y F, XIAO W J, ZHAO G C, 2013. Introduction to tectonics of China[J]. Gondwana Research, 23(4): 1189-1206.

附中文参考文献

高振家，李永安，钱建新，等，1982. 新疆阿克苏—柯坪地区震旦系冰川沉积的新资料[J]. 中国地质科学院天津地质矿产研究所所刊，5：43-56.

关保德，耿午辰，戎治权，等，1988. 河南东秦岭北坡中—上元古界[M]. 郑州：河南科学技术出版社：1-210.

李四光，1940. 鄂西川東湘西桂北第四紀冰川現象述要[J]. 地质论评，5(3)：171-184.

柳永清，旷红伟，陈骁帅，等，2023. 中国北方埃迪卡拉纪冰碛岩及冰川作用[J]. 地质学报，97(12)：3984-4005.

陆松年，高振家，1990. 新疆阿克苏地区晚元古代碎屑流和冰川沉积特征的对比[J]. 中国地质科学院562综合大队集刊，9：1-16.

牟用吉，1983. 罗圈组的冰碛成因和时代[J]. 河南地质，1(2)：35-46.

施雅风，任炳辉，谢自楚，1979. 三十年来我国冰川学研究的进展[J]. 冰川冻土，1(2)：1-6.

施雅风，任炳辉，1983. 中国冰川研究发展简史[J]. 冰川冻土，5(1)：21-31.

王敏，王猛，赵志中，等，2022. 中国第四纪冰川地质遗迹调查方法综述[J]. 地质论评，68(2)：1530-1540.

王乃昂，刘啸，程弘毅，等，2022. 论冰川颤痕[J]. 冰川冻土，44(4)：1319-1336.

吴瑞棠，关保德，1988. 论罗圈组的冰成特征及重力流改造[J]. 地质学报，62(1)：78-89.

杨玉卿，吴瑞棠，1992. 豫西罗圈组下伏古冰蚀面及冰蚀构造[J]. 河南地质，10(4)：282-285.

叶干，1984. 罗圈组的地质考察[J]. 地质科技情报(1)：69-71.

第一作者简介：

陈骁帅，国家地质实验测试中心助理研究员。在中国地质科学院地质研究所获博士学位，学习期间在奥地利维也纳大学开展冰川沉积学研究联合培养。曾在中国地质科学院地质研究所从事博士后研究工作，目前主要研究方向为前寒武纪沉积学、地层学与沉积地球化学。已发表论文46篇，其中第一作者论文7篇。获程裕淇优秀研究生奖，现任中国矿物岩石地球化学学会岩相古地理专业委员会副秘书长。



通信作者简介：

旷红伟，中国地质科学院地质研究所教授，博士生导师，主要从事沉积学、前寒武纪地层学与事件地质、油气地质研究。主持国家自然科学基金、科技部重点研发计划课题等。在*Geology*、*GSAB*、*GPC*、*PR*、《中国科学》国内外期刊发表论文200余篇，其中第一或通讯作者论文112篇。目前担任国际古地理学会创始会员、理事，中国古生物学会生物沉积学分会理事，中国地质学会沉积地质专业委员会委员，中国矿物岩石地球化学学会沉积学专业委员会委员，*Journal of Palaeogeography*学术委员，《古地理学报》副主编，《沉积学报》《岩石矿物学杂志》编委。

